

EL TIEMPO EN LA FÍSICA DEL SIGLO XIX

Gustavo Mariscal Guinea

Tutora: María de Paz Amérigo

Máster Universitario en Filosofía y Cultura Moderna

Universidad de Sevilla

Curso 2019-2020

CONTENIDO

1.	RESUMEN/ABSTRACT	1
1.1.	Resumen.....	1
1.2.	Abstract	1
2.	INTRODUCCIÓN.....	3
3.	EL ESTADO DE LA CUESTIÓN	5
3.1.	Newton y la culminación de la revolución científica.....	5
2.1.1.	El tiempo en la física newtoniana	7
2.2.	La física del siglo XVIII.....	10
2.2.1.	La polémica Leibniz-Clarke	12
2.2.2.	Euler	15
2.2.3.	D'Alembert	17
2.2.4.	Lagrange	19
2.2.5.	Laplace.....	21
3.	LA FÍSICA DEL SIGLO XIX	24
3.1.	Electromagnetismo	25
3.2.	Óptica	26
3.3.	Termodinámica	28
4.	LOS PROBLEMAS DE LA TEORÍA DEL TIEMPO EN EL SIGLO XIX	30
4.1	Helmholtz	30
4.2	Boltzmann	34
4.3.	Poincaré.....	42
4.4.	Duhem.....	49
5.	CONCLUSIONES	52
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	56

1. RESUMEN/ABSTRACT

1.1. Resumen

El presente trabajo intenta trazar el recorrido que el concepto de tiempo hace desde el planteamiento newtoniano hasta situarse a las puertas del paradigma relativista para intentar determinar si este concepto sufrió grandes cambios o, básicamente, se mantuvo inalterado hasta la llegada de la nueva perspectiva abierta con la Relatividad. Para ello, se analiza como punto de partida la concepción newtoniana del tiempo, básicamente mecánica, y el desarrollo inmediatamente posterior, centrándonos en las figuras de Leibniz, Euler, d'Alembert, Lagrange y Laplace. Posteriormente, repasamos de manera general las nuevas perspectivas desde las que se abordará la física en el siglo XIX: el electromagnetismo, la óptica y la termodinámica. Por último, evaluaremos a través de cuatro grandes figuras, como son Helmholtz, Boltzmann, Poincaré y Duhem, lo que suponen los nuevos puntos de vista que germinaron durante el siglo XIX para la noción de tiempo. En conclusión, se puede confirmar que la manera de abordar el problema del tiempo y su conceptualización sufrió un desarrollo provocado por los nuevos acercamientos a los problemas que planteaba la física.

Palabras clave: Tiempo, mecánica, termodinámica, física, matemáticas.

1.2. Abstract

This essay tries to outline the route that the concept of time followed from the Newtonian proposal up to its new situation on the threshold of the relativistic paradigm so as to decide if this concept underwent a radical transformation or if it basically remained unaltered until the arrival of the new perspective presented by the theory of relativity. To that end, the Newtonian understanding of time, basically mechanical, and its consequent development, is analysed as a starting point, focusing our enquiry on the leading figures of Leibniz, Euler, d'Alembert, Lagrange, and Laplace. Subsequently, we will go over the new approaches at physics in the Nineteenth Century: electromagnetism, optics, and thermodynamics. Finally, through the works of four prominent figures, i.e. Helmholtz, Boltzmann, Poincaré, and Duhem, we will assess what these new approaches, arisen in the Nineteenth Century, entailed as for the notion of time. To sum it up, it can be confirmed that the way of addressing the problem of time and its conceptualization

experienced a development caused by the new approaches to the problems that were set out by physics.

Key words: Time, mechanics, thermodynamics, physics, mathematics.

2. INTRODUCCIÓN

Está fuera de toda duda la enorme influencia de las aportaciones de Sir Isaac Newton en el pensamiento científico y filosófico. Sin embargo, la ciencia no se agota en su filosofía natural. El proceso de crecimiento y ampliación de las ciencias exige una labor de continuo replanteamiento de las posiciones no sólo en el ámbito de las direcciones en las que debe avanzar sino también en las estructuras más primarias sobre las que se sostienen las bases mismas del conocimiento científico. Somos conscientes de que el cambio de paradigma que se plantea a partir de la mecánica cuántica y la teoría de la relatividad han supuesto una ampliación de los fenómenos explicados por la ciencia, lo que nos torna capaces de explicaciones más precisas y profundas. No obstante, muchos de los conceptos, aun con distinta perspectiva, mantienen su papel fundamental en el ámbito de la física. Y no es que la mecánica clásica estuviese equivocada al elaborar las nociones sobre las que se sustentaba, sino que fueron fruto de su momento histórico. El mismo Einstein, una vez expuesta la superación de la física newtoniana escribió¹ en 1949:

Basta ya. Newton, perdóname: tú encontraste el único camino posible en tu época para un hombre de máxima capacidad intelectual y de creación. Los conceptos que tú creaste siguen rigiendo nuestro pensamiento físico, aunque ahora sabemos que, si aspiramos a una comprensión más profunda, hay que sustituirlos por otros más alejados de la esfera de la experiencia inmediata.

Pero el cambio desde la mecánica clásica al paradigma cuántico-relativista no tiene lugar por arte de magia. Ya desde que se establece una “ciencia normal” aparecen anomalías, nuevos hechos y necesidades explicativas que van mostrando el camino por el que se llegará a una crisis y, posteriormente, al establecimiento de un nuevo paradigma². Lo que vamos a intentar en el presente trabajo es recordar cuál era el estatuto del tiempo en la física newtoniana para luego determinar el impacto de los nuevos descubrimientos

¹Einstein, Albert: *Notas Autobiográficas*, Madrid, Alianza Editorial, 1984, pp. 34-35.

²Utilizamos la noción de paradigma en el sentido usado por Kuhn: «Llamo ‘paradigmas’ a realizaciones científicas universalmente reconocidas que, durante cierto tiempo, proporcionan modelos de problemas y soluciones a una comunidad científica. En este ensayo, ‘ciencia normal’ significa investigación basada firmemente en una o más realizaciones científicas pasadas, realizaciones que alguna comunidad científica particular reconoce, durante cierto tiempo, como fundamento para su práctica posterior. En la actualidad, esas realizaciones son relatadas, aunque raramente en su forma original, por los libros de texto científicos, tanto elementales como avanzados». Kuhn, T. S.: *La estructura de las revoluciones científicas, Breviarios*, México, Fondo de Cultura Económica, 1971, p. 319.

científicos en los ámbitos que provocarán un cambio definitivo ya entrado el siglo XX; el electromagnetismo, la óptica y la termodinámica nos servirán para atisbar los espacios que se escapaban a la explicación de la mecánica newtoniana y que ya mostraban la necesidad de nuevas explicaciones a principios del siglo XIX y que, acabando la centuria, evidencian la insuficiencia de la mecánica clásica y muestran el camino que habrá de recorrer la física a principios del siglo XX y que culminará con una nueva imagen del Universo y de la ciencia. Intentaremos analizar si en el caso concreto del concepto de tiempo el cambio es drástico o si sigue siendo básicamente el mismo y, por supuesto, las implicaciones epistemológicas que se deriven de su uso en ese tránsito del XIX en los nuevos ámbitos del conocimiento que toman importancia en ese siglo.

3. EL ESTADO DE LA CUESTIÓN

3.1. Newton y la culminación de la revolución científica

El salto definitivo desde una explicación del mundo y una física basada en los supuestos aristotélico-ptolemaicos hacia una nueva ciencia viene marcado por el método axiomático que, junto con el nuevo método experimental, está en la base del pensamiento newtoniano. Es tan importante la labor del inglés que ningún conocimiento se considerará válido en el siglo XVIII si no procede según la metodología newtoniana. El trabajo de Newton se puede entender como una síntesis entre el movimiento experimental y el deductivo-matemático. Se podría decir que en él culminan Boyle, Copérnico, Kepler, Galileo, Descartes y otros muchos.

Por toda su obra se encuentran testimonios de la interconexión de las matemáticas y la experiencia, pero en los *Principia* él mismo afirma que “la geometría está basada en la práctica mecánica, no es sino aquella parte de la mecánica universal que propone y demuestra el arte de medir”. Podemos dividir su método de investigación en tres fases:

- a) Simplificación por medio del experimento de los fenómenos para determinar exacta y cuantitativamente los trazos resaltados.
- b) Relación matemática de las cantidades determinadas.
- c) Aplicación de los resultados a otros campos o a otros fenómenos, o sugerir un perfeccionamiento de los instrumentos matemáticos.

En 1672, con el fin de refutar la teoría cartesiana sobre el comportamiento de la luz, Newton publica³ ya el llamado *experimentum crucis*. Este experimento es una construcción diseñada tras la observación y el planteamiento de una teoría cuyas hipótesis se intentan comprobar mediante el experimento elaborado. En este caso, se trataba de comprobar que la luz blanca estaba compuesta por haces de diferentes colores, para lo cual hizo incidir un haz de luz sobre un prisma que descompuso el original en varios colores distintos. Con un segundo prisma, se comprobó que se producía únicamente una refracción mientras se mantenía el color. Su finalidad es, pues, la de llegar a la causa

³ Newton, I.: 1972 A Letter of Mr. Isaac Newton, Professor of the Mathematicks in the University of Cambridge; Containing His New Theory about Light and Colors: Sent by the Author to the Publisher from Cambridge, Febr. 6. 1671/72; In Order to be Communicated to the R. Society. *Phil. Trans.* 6, 3075–3087. (doi:10.1098/rstl.1671.0072).

originaria del hecho que se está tratando explicar. El camino científico, posibilitado por la experiencia, termina en la matematización del fenómeno simplificado. Más allá, sólo hay hipótesis. Y de lo que se trata no es de explicar mediante esas hipótesis sino de “presentarlas y probarlas mediante la razón y los experimentos”. Se ha señalado por parte de algunos autores la obsesión de Newton por evitar toda expresión que pudiese ser criticada por hipotética (que se resume en la expresión *hypotheses non fingo*). No obstante, más que una obsesión podemos afirmar que es un propósito por reducir las hipótesis a las mínimas posibles. De esta manera queda definido el método propuesto por Newton.

El método de la filosofía experimental se aplica específicamente al movimiento, pasando de un estudio cinemático a uno dinámico. Los *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (1687) están divididos en tres libros: en el primero se estudian los movimientos determinados por fuerzas centrales, en el segundo se desarrolla la mecánica de los fluidos y el tercero explica los movimientos celestes. Ahora podremos dar un paso más en el conocimiento de las causas del movimiento y no nos hemos de limitar a una mera descripción del mismo. Tenemos ya una física totalmente nueva que quedará expuesta axiomáticamente (al estilo de Euclides) en los *Principia*.

La mecánica clásica, piedra angular de la ciencia moderna, se ha venido construyendo lentamente a partir de la obra de diversos autores que plantearon soluciones divergentes en cuestiones como la fuerza, la velocidad, la resistencia, la cantidad de movimiento... Como hemos señalado anteriormente, lo que hace Newton es axiomatizar la mecánica proponiendo un cuerpo de proposiciones básicas a partir de las cuales edificar un modelo coherente. Para clarificar el trabajo de investigación, se exponen antes las definiciones en las que se explican los términos usados. La labor de Newton es, pues, de definición, de ordenación y de asentamiento de unas bases (algunas ya enunciadas con anterioridad y muchas otras aportadas por él mismo) sobre las que se construye la ciencia. Los conceptos más importantes de los que parte son los de espacio, inercia, masa, fuerza y, el que centra nuestro trabajo, el de tiempo. Tienen en común el que todos son matemáticamente mensurables y, en lo sucesivo, ya no se admitirá en mecánica ningún concepto que no lo sea (la física, por su parte, seguirá siendo cualitativa y experimental). El movimiento vendrá definido en términos de espacio y tiempo; la velocidad como cambio de posición en un tiempo dado; la aceleración como cambio de velocidad por unidad de tiempo; la materia por la extensión, la duración y la masa. De todos los conceptos hay tres especialmente problemáticos por rozar lo hipotético: la masa, el espacio y el tiempo. De

la masa, Newton no dio una definición adecuada ya que, al concebirlo como relación entre volumen y densidad, caía en una definición circular. No es hasta Maxwell cuando se logra una definición satisfactoria que explica la relación entre fenómenos gravitatorios, eléctricos y magnéticos⁴. Sin embargo, las implicaciones de que esta definición sea tautológica no merman la utilidad de la teoría en su conjunto. Mayor dificultad tendrán los conceptos de espacio y de tiempo.

2.1.1. El tiempo en la física newtoniana

El problema de la definición del espacio y el tiempo creyó solucionarlo Newton estableciendo una distinción entre espacio y tiempo absolutos y relativos. Centrándonos en el tiempo, estamos acostumbrados a escuchar que Newton concibe el tiempo como absoluto, pero ¿de dónde viene esa afirmación y qué supone para esta nueva física? En uno de los escolios de los Principia, explica:

El tiempo, el espacio, el lugar y el movimiento son de todos conocidísimos. Y no los defino. Pero digo que el vulgo no concibe esas cantidades más que por su relación con las cosas sensibles. Para evitar ciertos prejuicios que de aquí se originan, es conveniente distinguirlas en absolutas y relativas, verdaderas y aparentes, matemáticas y vulgares⁵.

Por lo tanto, son cantidades que se dicen de tres maneras y, en el caso concreto del tiempo, ello supone una distinción entre dos clases de tiempo: el absoluto, verdadero y matemático, por una parte, y el relativo, aparente y vulgar, por otra. La influencia en la historia de la física de esta distinción no será menor. En palabras del propio Newton:

El tiempo absoluto, verdadero y matemático, en sí mismo y por su naturaleza, fluye uniformemente sin relación a ninguna cosa externa, y se le llama, con otro nombre, duración: el relativo, aparente y vulgar es cualquier medida (exacta o imprecisa) de la duración, realizada sensible y externamente por medio del movimiento, la cual es usada en vez del tiempo verdadero: como la hora, el día, el mes, el año⁶.

⁴Ortiz Acuña, Leonardo: “Newton y Maxwell: la contraposición corpúsculos-onda”, *Coris. Revista de Ciencias Sociales y Humanidades*, 2016, p. 94.

⁵Newton, Isaac: *Principios matemáticos de la Filosofía natural*, Madrid, Tecnos, 1987, p. 33.

⁶Newton, Isaac: *Op. cit.* pp. 33-34.

Para acabar con la imprecisión que se produce de no distinguir ambos, se puede definir el día solar medio como tiempo más verdadero y más apropiado al tiempo absoluto, cuyo flujo no puede cambiarse. Para ilustrar esta igualación astronómica de tiempos, menciona “las experiencias del reloj oscilatorio y de los eclipses de los satélites de Júpiter”⁷. Las cuatro principales lunas de Júpiter fueron descubiertas por Galileo con su telescopio y, miradas desde la Tierra, las vemos oscilar en línea recta en torno a Júpiter con amplitudes de oscilación distintas y cada una con un periodo de oscilación perfectamente definido. El conjunto constituye un reloj tan preciso que fue la referencia que usó Roemer⁸, en 1676, para estimar la velocidad de la luz por vez primera.

En su escolio, trata Newton de demostrar que podemos alcanzar nociones absolutas; lo hace partiendo del movimiento absoluto, que es el que corresponde a un cambio de espacio absoluto en un tiempo absoluto. A la distinción experimental entre movimientos absolutos y relativos se puede llegar por sus propiedades, por sus causas y, principalmente, por sus efectos. Es aquí donde describe la experiencia del cubo:

Los efectos por los que se distinguen los movimientos absolutos de los relativos son las fuerzas de alejamiento del eje de movimiento circular. En efecto, en un movimiento circular puramente relativo estas fuerzas son nulas, mientras que en el verdadero y absoluto son mayores o menores según sea la cantidad de movimiento. Supongamos que un caldero está colgado de una cuerda muy larga, y se le hace girar continuamente hasta que la cuerda, de retorcida, esté casi rígida, y luego se le llena de agua, y con el agua queda en reposo; y después con una cierta fuerza rápida se le hace girar en sentido contrario, de forma que, al irse relajando el hilo, persevera un largo tiempo en esta rotación; al principio la superficie del agua será plana, como lo era antes del movimiento de la vasija; pero cuando la vasija haga que el agua, al irse imprimiendo en ella la fuerza poco a poco, empiece también a dar vueltas de modo apreciable, poco a poco irá descendiendo el agua por el centro y ascendiendo por el borde de la vasija, para revestir una forma cóncava (según he experimentado yo mismo), y al hacerse el movimiento cada vez más intenso, ascenderá más y más, hasta que al dar vueltas en tiempos iguales a los de la vasija, se quede en reposo relativo respecto a ella. Este ascenso indica la tendencia a

⁷ Newton, Isaac: *Op. cit.* pp. 34.

⁸ Sánchez Ron, José M.: “La Física Clásica (II): la electrodinámica de Maxwell”, en *Einstein, su vida, su obra y su mundo*, Barcelona, Ed. Crítica, 2015, p. 18.

alejarse del eje del movimiento, y mediante esta tendencia se reconoce y mide el movimiento circular del agua verdadero y absoluto, completamente contrario al movimiento relativo⁹.

Bien, ¿qué se puede deducir de esta experiencia? Que lo que produce esa superficie cóncava, o esa tendencia a alejarse del eje de giro, es el movimiento absoluto y no el relativo. Al principio, cuando gira el caldero y no el agua, el movimiento relativo del agua respecto al caldero es máximo y el absoluto nulo (por eso el agua está plana); pero al final, cuando caldero y agua giran juntos, el movimiento relativo es nulo y el absoluto máximo (por eso se curva el agua). La convicción de Newton es la de que el movimiento absoluto es experimentalmente detectable. Sin embargo, eso no se podría hacer en el caso de una traslación uniforme; razón por la cual se ve obligado a introducir una hipótesis: que el centro del Universo está en reposo¹⁰.

Los conceptos absolutos de movimiento, espacio y tiempo son defendidos por Newton en virtud de ciertos principios físicos, que pueden ser discutibles pero que son indudablemente físicos. Ahora bien, también aduce razones teológicas pues ve en la eternidad de Dios el fundamento de la duración y, de forma análoga, en su omnipresencia el del espacio: “[Dios] no es la eternidad y la infinitud, sino eterno e infinito; no es la duración y el espacio, sino que dura y está presente. Dura siempre y está presente en todas partes, y existiendo siempre y en todas partes constituye la duración y el espacio”¹¹. Parece aquí poco clara la línea que separa la ciencia de la teología. Sin embargo, en lo que podemos considerar propiamente ciencia, el concepto de tiempo absoluto se basa en razones físicas.

La dinámica de Newton consolida la cinemática que había introducido en sus explicaciones el tiempo. La segunda ley del movimiento establece una relación entre la fuerza y la variación de la cantidad de movimiento en el tiempo (lo cual subraya nuevamente el papel fundamental del tiempo), y permite utilizar en la dinámica las leyes que Galileo había establecido para la cinemática. Demuestra cómo la atracción centrípeta del Sol implica una velocidad areolar constante, que el movimiento es elíptico y que debe haber una cierta relación entre los ejes mayores de las elipses y sus períodos; es decir,

⁹ Newton, Isaac: *Op. Cit.*, p. 37.

¹⁰ García, Manuel: “El tiempo en la física: de Newton a Einstein”, *Enharonar* 15, 1989, p. 46.

¹¹ Newton, Isaac: *Op. Cit.*, p. 619.

también da una explicación dinámica a las leyes de Kepler. Estos desarrollos que vienen descritos en las relaciones matemáticas desarrolladas por Newton, le llevarán a enunciar la ley de gravitación universal que, implícitamente, debería ser concebida como una acción a distancia e instantánea. Newton nunca se pronunció sobre estas implicaciones.

En el ámbito de las matemáticas también se da una interpretación del tiempo y el uso que hace de ellas Newton está impregnado de la noción de tiempo. Los “infinitésimos” son “razones o cantidades primeras y últimas” en una cierta sucesión (que tendría implícito el tiempo, pues implica la existencia de un término después de otro), los “límites” serían los últimos términos en esa sucesión (por tanto, nos volvemos a topar con el tiempo) y las “fluxiones”, que ahora llamamos derivadas¹², serían la medida de la variación con respecto del tiempo de una función que es dependiente del tiempo. Desde este hilo matemático tirarán posteriormente autores como Euler, Lagrange o Hamilton. Y así es como, más tarde, la mecánica newtoniana se convertirá en un mecanicismo determinista con Laplace.

2.2. La física del siglo XVIII

El impacto del método y la física newtoniana fue enorme en su momento, pero admite desarrollo e incluso objeciones. Tampoco se convirtió inmediatamente en el único modelo teórico del Universo de manera inmediata ya que convivió, por ejemplo, con la explicación cartesiana. A lo largo del siglo XVIII se discutirán y perfilarán los conceptos newtonianos, con el fin de ajustarlos cada vez más a una teoría matemática de la naturaleza. Esto llevará, en algunos casos, al cuestionamiento de las ideas newtonianas, en particular, la de fuerza, aunque ello no suponga salirse del esquema formal que Newton había diseñado en su mecánica. El concepto de fuerza es central para Newton, quien lo considera derivado de la experiencia, pero tuvo muchos detractores. D'Alembert, del que luego hablaremos, defiende que es (como el de masa o el de tiempo) enteramente matemático y derivable de los teoremas de la geometría sin referencia ninguna a la experiencia¹³. Para dar cuenta de la potencia de los presupuestos cartesianos y de cómo este sistema luchó en igualdad de condiciones con la nueva física, podemos señalar el ejemplo paradigmático de la discusión acerca de una cuestión concreta que puso durante

¹²Newton, Isaac: *Methodus fluxionum et serierum infinitorum*, Londres, Henry Woodfall, 1736.

¹³Hankins, Thomas L.: *Jean d'Alembert, Science and Enlightenment*. Cambridge, Cambridge University Press, 1985, p.29.

una temporada en suspenso el sistema newtoniano: el problema de los tres cuerpos, que plantea si se puede calcular la trayectoria de tres cuerpos en movimiento que interaccionan entre sí. Las dificultades que planteaba el cálculo de las posiciones y velocidades en el caso de la interacción entre tres cuerpos sometidos a mutuas fuerzas de atracción, resultó un quebradero de cabeza para una mecánica que estaba perfeccionando sus métodos y cuyos resultados había que confrontar con las medidas cada vez más precisas de las trayectorias de objetos celestes. Clairaut, d'Alembert y Euler estuvieron a punto de anunciar la inadecuación de las leyes newtonianas (y la consiguiente adhesión a la cartesiana teoría de los vórtices) para explicar el movimiento de los ápsides de la Luna hasta que cálculos más precisos negaron las discrepancias entre la teoría y la observación que se habían detectado en las primeras fases de sus estudios¹⁴. Pese a todo, los cálculos de este movimiento solo pueden hacerse de manera aproximada y habrá que esperar hasta el siglo XIX para llegar a soluciones más certeras. Lo que sí queda claro es que el sistema newtoniano consiguió sobreponerse a las objeciones cartesianas.

Conviene ahora exponer brevemente cómo surge la mecánica en el siglo XVIII. Tiene su origen en las matemáticas y en la pretensión de unos pocos “geómetras” de expresar matemáticamente las leyes que rigen la experiencia física. Heredan de la geometría la preocupación por distinguir las verdades demostrables a priori mediante el simple razonamiento de las verdades experimentales en las que habría que acudir a la verificación por medio de la experiencia. De estos dos tipos de verdades, tanto la geometría como la novedosa mecánica se centran en las verdades necesarias. La construcción de la ciencia de la mecánica se debe apoyar en unos enunciados deducidos de manera lógica de un reducido número de axiomas sin el concurso de la experiencia¹⁵. Sin embargo, como veremos en los casos particulares de Euler y d'Alembert, la intención de los “mecánicos” no se limita a la racionalización de un marco lógico-deductivo sino que también abordan la tarea de interpretar epistemológicamente el escenario que surge de su propuesta tanto en el nivel de organización de la experiencia sensible como en el de la validez y certeza del conocimiento obtenido mediante este nuevo método.

¹⁴Hankins, Thomas L.: *Op. cit.*, pp. 30-36.

¹⁵Romero, Ángel E.: “La búsqueda de los principios fundamentales de la mecánica: Euler y d'Alembert”: *Los procesos de formalización y el papel de la experiencia en la construcción del conocimiento sobre los fenómenos físicos*, Bogotá, Universidad de Antioquia y Universidad Pedagógica Nacional, 2008, p. 22.

Vamos a explorar con mayor profundidad algunas interpretaciones acerca del tiempo en los pensadores del ámbito científico más cercanos a Newton y las que se hicieron, ya con posterioridad, entrado el siglo XVIII. Para ello tenemos que empezar con una de las polémicas más famosas acerca de la cuestión y que se sitúa, precisamente, en los primeros años del siglo XVIII.

2.2.1. La polémica Leibniz-Clarke

Ya hemos visto que la filosofía natural newtoniana se fundamenta en tres conceptos básicos: el espacio, el tiempo y el movimiento. En lo que se refiere al tiempo, se concibe (igual que el espacio) como homogéneo, infinito y continuo. Es, pues, independiente de los entes físicos que en él se suceden “en” el tiempo y no “con” el tiempo¹⁶. Esto planteaba ya la pregunta de cómo se podía sostener la existencia de un tiempo (y consecuentemente de un espacio) absoluto que no puede ser comprobado experimentalmente. Desde un principio, Newton fue consciente de que tenía que realizar algunas aclaraciones que presentó ya en la segunda edición de los *Principia*, concretamente en el Escolio General.

Una de las más potentes objeciones a su sistema la planteó Leibniz desde un punto de vista metafísico-teológico. A diferencia de otros competidores intelectuales, el de Leipzig estaba a la altura de Newton en cuanto a formación científica y al manejo de las matemáticas. El filósofo alemán no estaba dispuesto a admitir la existencia de entidades absolutas y no verificables experimentalmente ni que se atribuyeran órganos a Dios (por el *sensorium Dei* newtoniano) ni tampoco que la obra del Creador fuese tan imperfecta que requiriese una acción continuada de “retoque”. En la polémica se enzarzaron tanto Leibniz como Clarke, a quien Newton pidió que defendiese de los ataques del germano. Las posturas de ambos bandos nunca llegaron a coincidir y se mantuvieron enrocados en sus posiciones, terminando la polémica en 1716 con la muerte de Leibniz.

La discusión comienza con las implicaciones que tendría aceptar que espacio y tiempo sean los órganos mediante los que Dios puede percibir las cosas: por un lado, decir que tiene órganos sería atribuir partes a Dios como si fuese un ser corporal y, por otro lado, supondrían la creación de una obra imperfecta que necesitaría de continuos retoques

¹⁶ Ponce Alberca, Carmen.: “Consideraciones en torno a la polémica Leibniz-Clarke”, *Espíritu*, 36, 1987, p. 82.

divinos. La repuesta de Clarke, situándose primeramente frente al materialismo del que se acusaba a Newton, es que Dios percibe las cosas inmediatamente dado que es omnipresente y que en ningún momento ha afirmado Newton que el espacio sea un órgano que permite percibir a Dios. Frente a las acusaciones de que el inglés defiende una creación imperfecta, contraataca Clarke diciendo que el Dios ausente que propugna Leibniz podría justificar el materialismo y que excluiría la providencia divina.

En respuesta a Clarke, Leibniz apunta a que el principio de no-contradicción en el que se fundan las matemáticas implica el materialismo. Por contra, cree que su propuesta demuestra la existencia de la divinidad ya que el principio de razón suficiente no constriñe la potencia divina. También se muestra en contra de la existencia del vacío y propone un espacio extenso de tipo cartesiano en el que la materia pone de manifiesto la sabiduría divina. Clarke explica que la filosofía natural de Newton describe una máquina del mundo que no funciona por sí sola, sino que implica una continua participación divina. Retoma la cuestión del *sensorium Dei* arguyendo que el sensorio sería, más que el órgano, el lugar de la sensación mediante el cual Dios está en contacto con el mundo.

La idea de un espacio absoluto nunca será aceptada por Leibniz, pues para él solo hay espacio en cuanto hay materia y sería, por lo tanto, relativo, ya que depende de la materia. El espacio quedaría definido como el orden de posibilidad de las cosas existentes en el mismo tiempo. Con el tiempo, sucedería lo mismo: no hay cambios ni sucesión que no ocurran en los entes físicos que se suceden en él. Sería, asimismo, relativo. La teoría leibniziana del tiempo y del espacio es fundamentalmente una teoría del orden temporal y espacial¹⁷. Aduce, sobre el asunto de la potencia divina, que Dios podría dejar (y, de hecho, deja) que el mundo se mantenga por sí mismo ya que la Creación es perfecta. Clarke responde afirmando que el espacio es consecuencia de un ser infinito y eterno, pero no es el ser infinito y eterno. Dios crea las cosas en el espacio y el tiempo y se ocupa de manera continua de su creación, actuando de manera perfecta.

En la respuesta subsiguiente, Leibniz vuelve a exponer su visión relativa del espacio. Si el espacio fuese una realidad absoluta tendría una realidad mayor que las mismas substancias y Dios no podría destruirlo ni tan siquiera modificarlo. Sería eterno e inmutable y, por lo tanto, o el espacio es Dios o es una entidad infinita diferente de Dios.

¹⁷Van Fraassen, B. C.: Introducción a la filosofía del tiempo y del espacio, Barcelona, Editorial Labor, 1978, p. 47.

Clarke afirma que Leibniz no comprende la naturaleza del espacio ya que este es una unidad que precede y hace posible todas las relaciones que se pueden descubrir en él. El espacio vacío sería una propiedad de un sujeto incorpóreo y Dios está presente en el espacio, aunque no pueda ser captado por nuestros sentidos. El espacio y el tiempo, de esta manera, serían atributos de Dios.

Leibniz seguirá manteniendo que el espacio es inexistente o imaginario y su muerte deja inconclusa la polémica. Podemos resumir el asunto en que, si Dios crea el mejor de los mundos posibles no se necesita que actúe reparando constantemente su obra. Para el caso concreto del tiempo, admitir que la creación del mundo señala el comienzo del tiempo y que al acontecimiento de la creación le podría haber precedido temporalmente otra cosa, no supone (como argumentaba Clarke) admitir que algo pudo haber acontecido antes del comienzo del tiempo, sino que es posible concebir un mundo alternativo en el cual ese primer evento de nuestro mundo no es el primer acontecimiento¹⁸. El vacío era una hipótesis absurda en el planteamiento leibniziano y el espacio y el tiempo solo tienen razón de ser en tanto en cuanto existen cuerpos materiales y hay una sucesión de hechos. Sin contenido material, no hay razón para la existencia de espacio y tiempo.

Para Newton, Dios crea el Universo, pero se sigue preocupando de su creación porque esta no goza de la perfección inmutable del Creador. Espacio y tiempo son necesarios para dar cuenta de los movimientos celestes y es imposible un movimiento en un espacio lleno de materia.

En definitiva, nos encontramos ante dos posiciones que discurren paralelas y que no confluyen en ningún momento. Para Leibniz, Dios crea el mejor de los mundos posibles y, por lo tanto, no necesita reparación permanente; no admite tampoco la existencia del vacío; espacio y tiempo solo tienen razón de ser en tanto que existen cuerpos materiales y sucesiones de hechos. Quedará el tiempo, de esta manera, ligado indisolublemente al contenido material y, por lo tanto, no se podría concebir de manera independiente y absoluta. Newton, por su parte, no pone límites a la potencia divina pero concibe el universo como perfecto desde su creación por parte de Dios aunque esa perfección necesite de su cuidado continuo por no ser inmutable. Espacio y tiempo son necesarios para dar cuenta de los movimientos celestes. El movimiento implica la existencia del

¹⁸Van Fraassen, B. C.: *Op. cit.*, pp. 36-37.

vacío, pues sería imposible en un espacio completamente lleno de materia. El tiempo, como ya hemos dicho, debe ser concebido como absoluto e independiente de la materia¹⁹.

2.2.2. Euler

La figura de Leonhard Euler ha sido considerada como eminentemente matemática o técnica. Sin embargo, podemos encontrar en su obra publicaciones en las que la reflexión científico-filosófica juega un papel fundamental, especialmente en lo referente a la constitución de la materia y a la estructura en que se deben sustentar los fundamentos de la mecánica. En su obra *Mechanica sive motus scientia analytice exposita* (1736) ya aborda la intención de utilizar el método analítico para reorganizar la mecánica y la consiguiente reformulación de los principios generales sobre los que sustentan esa ciencia. Ese nuevo método analítico supone el uso sistemático del simbolismo y los procedimientos del cálculo diferencial e integral que había conocido a través de los hermanos Bernoulli. Pero el método no queda restringido a la faceta técnica, sino que es también un método heurístico mediante el cual descubrir y concebir los nuevos conceptos y enunciados de la mecánica, además de representarlos matemáticamente. Parte Euler desde la crítica a los métodos utilizados con anterioridad o, más bien, a la ausencia de un método fiable:

lo que pasa con todos los escritos que han sido compuestos sin análisis pasa sobre todo con aquellos que tratan de la mecánica, a saber, que el lector, incluso si está convencido de la verdad de las cosas que ellos enuncian, no llega sin embargo a adquirir un conocimiento suficientemente claro y distinto; de suerte que, si se cambia solo un poco las mismas cuestiones, él difícilmente puede resolverlas por sus propias capacidades²⁰.

Esta imposibilidad de alcanzar un conocimiento claro y distinto se le achaca al propio Newton pues, aunque es indudable para Euler que el inglés ha contribuido al progreso de la ciencia que explica el movimiento, imposibilita un seguimiento completo de la resolución de los problemas planteados debido a que se trata la mecánica “sintéticamente según el método de los antiguos”, es decir, a la manera de los geómetras. Se hace necesario para Euler un nuevo método en busca de la inteligibilidad: el analítico. De esta

¹⁹Ponce Alberca, Carmen.: *Op. cit.*, pp. 89-90.

²⁰Euler, Leonhard. Tomado de Romero, Ángel E. citando la traducción francesa inédita de Firode, A.

manera se podría hacer de la mecánica una ciencia exclusivamente racional con principios absolutamente necesarios prescindiendo del concurso de la experiencia.

Tras el asentamiento del método, en su *Mechanica* la reflexión se centra en la significación de los conceptos que la ley de la inercia lleva implícitos que, como ya sabemos, son los de espacio, tiempo y movimiento. Euler retoma la tradición newtoniana de distinguir al cuerpo como esencialmente diferente del espacio y de enfatizar la distinción entre los conceptos relativos y absolutos. Pero dado que el sistema propuesto por Newton ya está instalado, lo que se discute sobre los conceptos primarios de la mecánica no es tanto su existencia como su cognoscibilidad. El intento de Euler no es el de postularlos en virtud de necesidades metafísicas u ontológicas sino en función de un criterio metodológico: el de resultar apropiadas para las leyes del movimiento. La certeza de estos conceptos, y entre ellos el tiempo, que es el que nos ocupa, debe buscarse en función de un criterio lógico y no como una mera abstracción realizada por el pensamiento a partir de la experiencia sensible.

En su obra *Reflexiones sobre el espacio y el tiempo* (1748), espacio y tiempo quedarán validados de forma mucho más explícita como condición de posibilidad del incuestionablemente válido principio de inercia. Para no caer en el error de determinar incorrectamente una definición de ambos conceptos, lo único que se les pide es que no entren en contradicción con los principios reconocidos de la mecánica. La realidad del tiempo se establece, pues, por ser indispensable para nuestra representación científica del mundo, es decir, atendiendo a su función dentro del sistema de la física matemática. Tendremos, de esta manera, una concepción realista del tiempo (y del espacio), en las que se le atribuye de manera imperativa una existencia real²¹, negando que una “pura imaginación” pueda servir de fundamento para los principios reales de la mecánica²². Lo que propone, en definitiva, es que la realidad del espacio y del tiempo se establece por la necesidad de estos conceptos para la representación científico-matemática del mundo, quedando la definición de los mismos supeditada a su función. Ahora bien, ya sabemos que espacio y tiempo son reales, pero... ¿cómo son? Frente a las tesis cartesianas y leibnizianas (gran parte de la obra la dedica a refutar estas posturas), toma Euler partido

²¹Euler, Leonhard: *Reflexiones sobre el espacio, el tiempo y la materia*, Madrid, Alianza Editorial, 1985, p. 41.

²²Romero, Ángel E.: *Op. cit.*, pp. 27-29.

por Newton al afirmar que deben ser absolutos debido a que la ley de inercia exige un marco de referencia absoluto, facilitando la determinación de lo que entendemos por velocidad uniforme.

Posteriormente en *Theoria Motus*, obra de 1765, afirmará sorprendentemente el carácter abstracto del espacio, haciendo de este “una idea vaga e imaginaria”, siendo movimiento y reposo referidos a los cuerpos y no independientes de ellos, es decir, relativos. Parece que abandona las concepciones de espacio y tiempo absolutos y que reniega de lo afirmado en las *Reflexiones*. Sin embargo, vuelve a imponerse el peso de la ley de inercia:

Quien quiera negar el espacio absoluto caerá en gravísimas dificultades. En efecto, debiendo rechazar el movimiento y el reposo absolutos en cuanto sonidos vanos, no solo debe rechazar las leyes de movimiento que se apoyan en este principio, sino que también está obligado a afirmar que no se dan leyes del movimiento²³.

Lo que parece indicar Euler es que tenemos dos planos completamente diferenciados: por un lado, lo sensible; por otro, lo racional. Los sentidos no pueden sino darnos información sobre lugares, tiempos y movimientos relativos. En ese sentido, ninguna clase de experiencia nos puede remitir a un espacio o a un tiempo absolutos. Estamos, en este caso, formulando estos conceptos relativos por su valor operativo puramente funcional. Pero el valor epistemológico necesita del espacio y tiempo absolutos como condiciones necesarias de las leyes mecánicas, aunque no podamos conocer qué sean debido a su carácter no sensible.²⁴

2.2.3. D'Alembert

Otro de los autores que centró el foco de las discusiones en establecer las bases de la mecánica y asentar los conceptos en ella utilizados fue Jean Le Rond d'Alembert. De manera general, podemos situar a d'Alembert frente a Newton y Euler en cuanto a la importancia del concepto de fuerza, que él consideraba carente de significado y sin valor para la mecánica pero que jugaba un papel fundamental en la propuesta de estas dos figuras. Con Euler, y esta vez frente a Newton y Laplace (a quien estudiaremos

²³Euler, Leonhard: *Theoria Motus Corporum Solidorum seu Rigidorum*, Rostichii et Gryphiswaldiae, A. F. Röse, 1765, pp. 6-7.

²⁴Rioja, Ana: “Comentario a las Reflexiones sobre el espacio y el tiempo”, en Euler, Leonhard: *Reflexiones sobre el espacio, el tiempo y la materia*, Madrid, Alianza Editorial, 1985, pp. 24-27.

posteriormente), recalcó la independencia de los conceptos de la mecánica con respecto de la experiencia, proclamando que estos debían ser completamente matemáticos y derivables de los teoremas de la geometría²⁵.

Los objetivos de d'Alembert son dos: por una parte, fundar de manera necesaria los principios de la mecánica para poder convertir la teoría del movimiento en una ciencia puramente racional y, por otra, reducir esos principios al menor número y con la mayor claridad posible. Tal empeño en organizar la ciencia mecánica obedece a unos presupuestos filosóficos que establecen una unidad entre los aspectos técnicos y los postulados epistemológicos que permiten la certeza de nuestro conocimiento. El método debe aplicar no solo “conocimientos potentes de las ciencias más abstractas y por consecuencia más simples [el álgebra y la geometría], sino incluso considerar de la manera más abstracta y simple que se pueda, el objeto particular de esta ciencia”²⁶.

D'Alembert también pone en cuestión los conceptos de espacio y tiempo absolutos como entes con existencia en sí mismos con una intención diferente de la de Euler y desde otros supuestos. Para d'Alembert no solamente hay distinción entre el cuerpo y la extensión que ocupa, sino que tal distinción es la que permite explicar el movimiento. Como ya Euler propusiera con anterioridad, el criterio de justificación del espacio y del tiempo debe ser metodológico y debe adaptarse a una explicación clara de lo que es el movimiento²⁷. Sin embargo, en este caso pretende alejarse de todo atisbo de metafísica y rechaza su existencia propia antes de toda materia, para concebirlos como verdades de evidencia, es decir, ideas simples y evidentes que no necesitan ser definidas y que no tienen ningún referente substancial u ontológico. Serían, sin embargo, necesarias como ideas simples que el espíritu abstrae a partir de la experiencia y que están contenidas en la idea compuesta de movimiento.

El tiempo queda, de esta manera, completamente desconectado de la experiencia y pasa a ser un requisito formal. Así, queda justificado el papel que juega dentro de la mecánica y no necesita postular o dar cuenta del salto desde la experiencia sensible hasta el orden que requiere la ciencia. Al situarse como una idea mínima, clara, distinta y evidente no ya como hecho de la experiencia sino como requisito para interpretar el

²⁵Hankins, Thomas L.: *Op. cit.*, p. 29.

²⁶D'Alembert: *Traité de Dynamique*, París, 1743, p.iv.

²⁷Romero, Ángel E.: *Op. cit.*, pp. 27-28.

mundo a partir la estructura racional tenemos una ventaja: la percepción ha sido eliminada como elemento distorsionador, como mediador imperfecto y eso nos acerca a una descripción más fiel de la realidad. Sin embargo, ¿son las ideas claras y distintas, como la del tiempo, comunes a cualquier racionalidad y, más específicamente, a cada individuo? ¿Cómo podemos estar seguros de que esos conceptos puramente geométricos, llevados a la abstracción más extrema, son los mismos para todos y permiten un conocimiento de tipo universal? Será Kant quien extienda esta idea, que en d'Alembert está desarrollada exclusivamente para la mecánica, al conocimiento en general, estableciendo los límites, las posibilidades y los requisitos de las distintas ciencias y la forma en la que encajan unas con otras.

2.2.4. Lagrange

El esfuerzo por lograr una organización completamente racional de la mecánica llevado a cabo durante el siglo XVIII culmina con los trabajos de Joseph-Louis Lagrange (1736-1813). Durante los primeros años de desarrollo de esta rama del saber, se habían venido tomando como referencia diferentes principios como el de la vis viva, el de mínima acción, el de conservación de la dirección... que enfocaban los diversos problemas a los que se quería dar solución con este nuevo método. La gran victoria de Lagrange fue la de lograr deducir todos los principios de la mecánica que se habían venido utilizando hasta ese momento de uno solo: el principio general del equilibrio, principio de las velocidades virtuales²⁸ o, como ha llegado a la actualidad, principio de d'Alembert. Mediante el método desarrollado por Lagrange se logra reducir en un sistema único y lógicamente cerrado el conjunto formado por la dinámica y la estática, reduciendo la dinámica a un caso particular de equilibrio (que, por lo tanto, debe encerrar cierto carácter dinámico). En sus propias palabras: “Este principio no es solamente por sí mismo muy simple y muy general; tiene además la ventaja preciosa y única de poderse traducir en una fórmula general que abarca todos los problemas que uno puede proponer sobre el equilibrio de los cuerpos”²⁹. De esta manera se cumplirían los dos objetivos que se plantea en su *Mecánica analítica*, que no son sino

- 1) Reducir la teoría de la mecánica y el arte de solucionar los problemas asociados

²⁸Fraser, Craig G.: “J. L. Lagrange’s Early Contributions to the Principles and Methods of Mechanics”, en *Archive for the History of Exact Sciences*, 28, 1983, pp.233-234.

²⁹Lagrange, J. L.: *Mécanique analytique*, Paris, Albert Blanchard, 1965, p.1.

a una fórmula general, cuyo desarrollo simple proporcione todas las ecuaciones necesarias para la solución de cada problema y 2) Unir y presentar desde un punto de vista, los diferentes principios que han sido, hasta ahora, encontrados para ayudar en la solución de problemas en mecánica; mostrando su dependencia mutua y haciendo un juicio de su validez y alcance posible³⁰.

La concepción lagrangiana del análisis se desarrolla frente a las posturas matemáticas y filosóficas representadas por autores como d'Alembert y Descartes para quienes el proceso matemático se constituía deductivamente a partir de verdades a priori como el número, la extensión o el tiempo. En contraste, la contribución de Lagrange enfatiza el análisis entendido en un sentido completamente formal, alejado de toda posible interpretación que pudiera impedir la unificación de las matemáticas puras y las aplicadas. A lo largo de su obra aplica de manera satisfactoria esta visión de las matemáticas en problemas que hasta ese momento habían requerido de una aproximación sintética³¹. Su negativa a considerar cualquier referencia a la geometría queda resumida en la sentencia en la que afirma que “no se encontrarán figuras en este libro”³². La construcción sintética, que parte desde los principios más generales hasta desplegarse en los problemas más concretos, requería que, previamente a la construcción axiomática, se definiesen los conceptos fundamentales, entre los que encontramos el espacio y el tiempo. Lagrange comienza su *Mecánica analítica* directamente con la discusión de los principios analíticos y sus relaciones mutuas. Excluye, pues, todo método matemático que no sea propiamente analítico y, especialmente, métodos no matemáticos, siendo particularmente cuidadoso de no introducir las reflexiones científico-filosóficas que autores como Newton, Euler o d'Alembert habían incluido en los textos de fundamentación de la mecánica. Intenta, de esta manera, tratar a la mecánica como una rama más de la matemática pura que le asegure un estatus de ciencia matemática infalible³³. Esta es, sin embargo, pese a lo que en principio pudiera parecer, una decisión profundamente filosófica, pues al evitar metodológicamente incluir discusiones filosóficas acerca del estatuto ontológico o epistémico de los conceptos con los que trata, está, no solo evitando entrar en

³⁰Lagrange, J. L.: *Op. cit.*, p. 1.

³¹Frasier, Craig G.: “Lagrange’s analytical mathematics, it’s Cartesian origins and the reception in Comte’s positive philosophy”, *Stud. Hist. Phil. Sci.*, Vol. 21, Nº 2, 1990, pp. 249-251.

³²Lagrange, J. L.: *Op. cit.*, p. 6.

³³Pulte, Helmut: “Joseph Louis. Lagrange, *Méchanique Analytique*, First Edition (1788)”, en I. Grattan-Guinness (de.): *Landmark Writings in Western Mathematics, 1640-1940*, Elsevier B. V., 2005, pp. 209-211.

controversias, sino favorecer además el método analítico como ‘verdadero’ método para la mecánica, impidiendo así cualquier controversia al respecto.

Lagrange concibe y desarrolla la mecánica como una geometría de cuatro dimensiones, siendo el tiempo la cuarta de ellas; lo que supone que la mecánica de la fuerza pasará a ser una rama de la teoría matemática de funciones. La mecánica de Newton trata con fuerzas que son magnitudes vectoriales, mientras que la mecánica de Lagrange tratará con energías cinéticas y potenciales que son cantidades escalares, es decir, recibe un tratamiento totalmente algebraico. De esta forma, el espacio absoluto derivado de la mecánica newtoniana no tendría ya sentido y se impondría un espacio (y un tiempo) relacional. Como ya hemos señalado, el tiempo de esta forma no recibe una atención en el ámbito epistemológico y se limita a ser una variable dentro del análisis matemático. Esto permite evitar toda controversia epistemológica al respecto, haciendo que el tiempo mantenga su carácter de variable independiente y absoluta, como si solo jugara el papel de medidor del movimiento.

2.2.5. Laplace

La visión newtoniana es desarrollada completamente por Pierre-Simon de Laplace quien, construye sobre ella un sistema completo que abarca desde las fuerzas moleculares hasta la mecánica celeste. En su *Exposición del sistema del mundo* (1796) se propone dar cuenta de los descubrimientos realizados hasta la fecha sobre el sistema del mundo, “sin recurrir al análisis”, en un intento de acercar la ciencia newtoniana al mayor público posible³⁴. Para Laplace, todos los fenómenos físicos se pueden reducir finalmente a un sistema de partículas densamente distribuidas que ejercen fuerzas de atracción y repulsión a una cierta distancia. Su mayor logro consistió en el intento de demostrar que el sistema solar se constituye como un sistema perfectamente autorregulado, al menos a plazo medio –pese a que el caos determinista entre en juego cuando consideramos tiempos muy largos–. El universo perfecto que implicaba esta concepción no poseía historia, era un mecanismo perfecto.³⁵ Su concepción determinista que defendía la posibilidad de un

³⁴Ordóñez, Javier y Rioja, Ana: “Introducción” en Pierre-Simon de Laplace: *Exposición del sistema del mundo*, Barcelona, Crítica, 2006, pp. 40-41.

³⁵Guzón, José Luis: *El nuevo estatuto del tiempo*, Salamanca, Universidad Pontificia de Salamanca, 2002, pp. 115-116.

conocimiento completo del mundo³⁶. Así plantea la posibilidad teórica del llamado Diabolo de Laplace:

Un intelecto que en un instante dado conociese todas las fuerzas que actúan en la naturaleza y la posición de todas las cosas de que se compone el mundo - suponiendo que dicho intelecto fuese lo bastante vasto para someter estos datos al análisis- abarcaría en la misma fórmula los movimientos de los cuerpos más grandes del universo y los de los átomos más pequeños; para él no sería nada incierto, y el futuro, lo mismo que el pasado, sería presente a sus ojos³⁷.

De esta forma, seremos capaces de calcular el pasado y el futuro del universo a partir de la observación de uno cualquiera de sus estados instantáneos porque la lógica de la causalidad funciona igual hacia atrás que hacia delante en el tiempo. La historia del universo físico podría ser representada como una serie matemática continua de estados instantáneos definidos por una cantidad enorme de entidades corpusculares con posiciones y velocidades calculables donde cada estado se ve implicado por una configuración anterior e implica una futura. Esto requiere que aceptemos varios supuestos: entre ellos la continuidad espaciotemporal y la simultaneidad absoluta de sucesos cualquiera que sea la distancia entre ellos. Si entendemos la realidad física de esta manera, estamos admitiendo la eternidad de las partículas homogéneas que la componen. La unidad de la materia en el tiempo es consecuencia de la homogeneidad del tiempo y eso convierte al tiempo en un mero accidente, puesto que la materia y las leyes que rigen sus interacciones son idénticas sea como sea el intervalo de tiempo que estemos considerando.

Dicho de otro modo, las causas implican sus efectos y viceversa. Se establece así la reversibilidad del tiempo. Esta relación causal no solo sería lógica sino también epistemológica: podríamos derivar cualquier estado del universo a partir de sus estados futuros, pero también de sus estados pasados. Se nos abre la posibilidad de conocer el futuro y el pasado. De ser así, la dirección del tiempo que nos parece tan cotidiana no tendría sentido en la mecánica racional y no habría diferencia alguna entre las dos direcciones del tiempo³⁸.

³⁶Prigogine, Ilya: *La nueva alianza. Metamorfosis de la ciencia*, Madrid, Alianza, 1990, p. 82.

³⁷Laplace, Pierre-Simon: *Introduction à la théorie analytique des probabilités, Oeuvres Complètes*, París, 1886, p. VI.

³⁸Capek, Milic: *El impacto filosófico de la física contemporánea*, Madrid, Tecnos, 1973, pp.133-136.

El siglo XVIII comienza siendo testigo del éxito de la teoría newtoniana pero no se agota con ella. El desarrollo de las matemáticas implica que la relación que se había proclamado entre los hechos y su descripción matemática tenía que cambiar conforme se desarrollaban las posibilidades de este nuevo lenguaje matemático. Desde la geometría y el análisis se están continuamente repensando los fundamentos y la estructura de las matemáticas, así como las relaciones entre sus partes. Esto, por supuesto se refleja en la mecánica y en sus conceptos fundamentales, entre los que está el tiempo que, como hemos visto, es interpretado desde diferentes puntos de vista cuyas diferencias tienen su origen en las distintas fundamentaciones de las matemáticas.

3. LA FÍSICA DEL SIGLO XIX

El siglo XIX es testigo de la culminación de un proceso que cambiaría por completo la práctica y la percepción que se tiene de la ciencia: la institucionalización. De ser practicada por una minoría de sujetos pudientes que podían dedicar sus esfuerzos personales y económicos al desarrollo de la práctica científica movidos prácticamente por el amor al saber, pasó a estar apoyada por los poderes públicos del ámbito político e industrial en primera instancia y, posteriormente, del militar. Los recursos, especialmente los económicos, pasaron a estar gestionados conforme a criterios profesionales, fomentando una cierta competitividad dentro del ámbito científico a imagen de la que se produce en el mundo de la producción industrial. El científico pasa a ser un profesional especializado en el estudio del funcionamiento de la Naturaleza y de las posibilidades que esta ofrecía al ser humano. Las academias reales, elitistas y anquilosadas, pasan a segundo plano mientras las asociaciones profesionales emergen con fuerza. La ciencia se está convirtiendo en el elemento central de una cosmovisión que va dejando de lado otras expresiones culturales y empieza a jugar un papel determinante en el impulso humano por entender su lugar en el mundo, pero también para transformarlo, explotando las fuerzas de la naturaleza para su beneficio. La física del siglo XIX contribuirá al desarrollo intelectual de la civilización básicamente de tres maneras: generando las ideas y los conceptos que tratan de explicar las fuerzas que gobiernan el Universo; proporcionando las herramientas teóricas que permitan el aprovechamiento de esas fuerzas con el fin de impulsar el crecimiento económico; por último, sirviendo de cuna de un conjunto de inquietudes de carácter trascendental³⁹.

El proceso de institucionalización y de integración de las ciencias en el tejido industrial puede ser explicado por los avances en química orgánica aplicados en la industria de los tintes, el enorme desarrollo teórico del electromagnetismo que propició la llegada de la telegrafía con hilos (y posteriormente sin ellos), la de la luz eléctrica, la radio, el transporte en trenes eléctricos, una gran cantidad de procesos industriales basados en la electricidad y el magnetismo... Muchas de las grandes novedades con las que acabó el siglo y que acabarían por florecer en el siglo posterior (con la física relativista y cuántica),

³⁹Guzmán, Ricardo: "Ciencia, tecnología y sociedad en el siglo XIX", Revista de Humanidades, nº 36, 2017, p. 147-149.

fueron consecuencia de investigaciones comenzadas en el ámbito del electromagnetismo⁴⁰.

Sin embargo, el desarrollo de la ciencia no se limita a esta rama, sino que se extiende a otras como son el de la óptica y, de forma mucho más significativa para el tema que nos compete, la termodinámica. El elemento unificador (no solo dentro de la física, sino también de la ciencia en general) será el concepto de energía, que sustituye al de fuerza como concepto clave de las nuevas ciencias y que se ligaría a los ámbitos políticos y económicos, pues el mundo estaba cambiando y el poder y la supervivencia de los países pasará a depender de la posesión y la gestión de los recursos energéticos⁴¹. Thomson en su *Treatise on Natural Philosophy* presenta el principio de conservación de la energía usando la dinámica analítica de Lagrange como entramado matemático en el que se integraba la noción de conservación de la energía, presentando una realidad física cuyos constituyentes fundamentales eran la materia y la energía⁴². Pasaremos a repasar los principales avances en cada uno de estos tres ámbitos de la física para tener una idea más aproximada de la coyuntura con la que nos encontramos antes de entrar de manera más específica en sus implicaciones epistemológicas en general y lo que suponen para el concepto de tiempo en particular.

3.1. Electromagnetismo

A principios de siglo, Galvani y Volta construyen por primera vez una pila. Unos años antes, Coulomb había establecido que las cargas eléctricas se atraen o repelen en una intensidad inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa. La pila química de Volta funciona estableciendo un medio entre las cargas que hace que, gracias a la resistencia que ejerce, estas se muevan a velocidad constante mientras ese medio se calienta (y se altera de otras maneras). Las pruebas de la conexión entre los fenómenos eléctricos y magnéticos llegan poco después con el danés Oersted, quien constata que una aguja magnética podía ser desviada por un cable conductor a través del cual circule una

⁴⁰Sánchez Ron, José M.: “La física en España (I): el Siglo XIX”, *Revista Española de Física*. Enero-Febrero, 2003, pp. 5-6.

⁴¹Guzmán, Ricardo: *Op. cit.* p. 156.

⁴²Harman, Peter M.: *Energía, fuerza y materia: El desarrollo conceptual de la física del siglo XIX*, Madrid, Alianza Universidad, 1990, pp. 90-92.

corriente eléctrica. Ampère demostró que las corrientes que pasan por dos cables ejercen entre sí una influencia igual a la de los polos de un imán y Faraday logró inducir una corriente moviendo un imán cerca de una fuente de corriente variable.

La manera de hacer evidente la relación entre la electricidad y el magnetismo es mediante la utilización de los conceptos de campo eléctrico y magnético, concepto introducido por Maxwell a partir de las 'líneas de fuerza' de Faraday. Estos campos pueden ser producidos por cargas eléctricas en el caso de los campos eléctricos mientras que las cargas eléctricas en movimiento (corrientes) producen campos eléctricos y magnéticos. Los campos eléctricos ejercen fuerzas sobre cualquier carga, mientras que los magnéticos lo hacen sobre partículas cargadas en movimiento. Lo interesante es que un campo eléctrico puede ser producido por un campo magnético variable, y viceversa. Maxwell desarrolló de una forma matemática precisa todos estos hallazgos cualitativos e, inesperadamente, al resolver las ecuaciones formuladas predijo un nuevo tipo de campo electromagnético (el producido por cargas eléctricas aceleradas) que se propagaría en forma de ondas. Estas ondas fueron generadas en 1887 por Hertz, sentando las bases para la radio, el radar, la televisión y otras formas de telecomunicación⁴³.

3.2. Óptica

Ya Einstein señaló que “el aspecto menos satisfactorio de este sistema [el newtoniano] -aparte de las dificultades ínsitas en el concepto de 'espacio absoluto', que hace muy poco se han planteado una vez más- está en su descripción de la luz, que Newton también concibió compuesta por puntos materiales, de acuerdo con su sistema”⁴⁴. La insuficiencia de las explicaciones acerca de qué es la luz y de métodos para estudiarla correctamente había dejado lugar para múltiples posiciones ninguna de las cuales daba cuenta del fenómeno de manera conveniente. Había, pues, camino abierto para el avance en este campo.

La discusión sobre si la luz es una onda o tiene origen corpuscular venía ya de lejos pero ningún experimento había conseguido decantar la balanza por ninguna de las

⁴³Alonso, Carlos J.: *Historia básica de la ciencia*, Pamplona, EUNSA, 2001, pp. 387-390.

⁴⁴Einstein, Albert: “La influencia de Maxwell en el desarrollo de los conceptos de la realidad física”, 1931 a.

posiciones. A principios del siglo XIX, Young demuestra el fenómeno de la interferencia de la luz, con lo que se confirma el carácter ondulatorio de la misma. Fresnel continúa la senda iniciada por Young y confirma la teoría ondulatoria estudiando y explicando el fenómeno de la difracción. Fresnel predijo matemáticamente que, si se iluminaba un disco opaco con luz monocromática, en el centro de la sombra del disco debía formarse un punto brillante, reforzando una vez más el carácter ondulatorio de la luz. En este punto vuelve a entrar en juego Maxwell, pues sus ecuaciones demuestran el origen electromagnético de la luz ya que la onda luminosa correspondería a campos eléctricos y magnéticos oscilantes. Y nuevamente es Hertz quien lo confirma en 1889. Además, de las ecuaciones de Maxwell se predice la existencia de ondas de luz en el espectro no visible. Otro de los descubrimientos de Maxwell fue el de la relación entre la velocidad de la luz en diferentes medios (y en el vacío) con propiedades del espacio y la materia de las que dependen los efectos eléctricos y magnéticos. Nos encontramos, por lo tanto, ante la unificación de la óptica con el electromagnetismo, enunciada por Maxwell de la siguiente manera: “Difícilmente podemos evitar la inferencia de que la luz consiste en ondulaciones transversales del mismo medio que es causa de los fenómenos eléctricos y magnéticos⁴⁵”. Hay que apuntar que los grandes avances que supusieron las ecuaciones de Maxwell no fueron inmediatamente entendidos ya que no resultaron fáciles de interpretar por su estilo analítico y conceptual⁴⁶. Baste mencionar que el propio Hertz afirmó que “no siempre he estado seguro de haber captado el significado físico de sus afirmaciones, de manera que no me ha sido posible guiarme en mis experimentos por el libro de Maxwell. Más bien, he sido guiado por el trabajo de Helmholtz⁴⁷”. Sin embargo, pese a los grandes avances registrados, no se logró ninguno en lo referente al medio en el que se propagaban las ondas, el “éter luminífero”. No es hasta 1887, cuando Michelson y Morley demuestran, mediante experimentación, que no se puede medir el desplazamiento la Tierra con respecto al éter. Sin embargo, pocos todavía dudan de la existencia de ese sustrato que sostiene todos los fenómenos. No será hasta Einstein cuando se tenga

⁴⁵Maxwell, James Clerk: “On physical lines of force”, *Scientific Papers*, vol. 1, p. 500.

⁴⁶Sánchez Ron, José M.: “La Física Clásica (II): la electrodinámica de Maxwell”, en *Einstein, su vida, su obra y su mundo*, Barcelona, Ed. Crítica, 2015, pp. 18-21.

⁴⁷Hertz, Heinrich: *Untersuchungen über die Ausbreitung der elektrischen Kraft*, Leipzig, Johann Ambrosius Barth,

completa constancia, no solo de que no se pueda demostrar su existencia, sino de la inexistencia del éter.

3.3. Termodinámica

La termodinámica, que ya estaba prestando sus servicios a la sociedad industrial desde finales del siglo XVIII con el desarrollo de las primeras y más rudimentarias máquinas de vapor⁴⁸, acaba por alcanzar su pleno desarrollo en el siglo XIX. Los conceptos básicos de esta rama, calor y temperatura, se aclaran por fin y se relacionan con otros como los de trabajo y energía que hasta ese momento habían sido aplicados casi exclusivamente en la mecánica. En principio, lo que nosotros experimentamos al tocar un cuerpo caliente es una sensación subjetiva y cuando damos calor a un cuerpo, decimos que aumenta su temperatura. Para medir la temperatura, los científicos aprovecharon el hecho de que una adición de calor produce cambios en algunas propiedades bien definidas y fácilmente medibles de los cuerpos (longitud de una columna de mercurio, presión de un gas dentro de un recipiente cerrado...). Así, se puede establecer una *ecuación de estado* que relaciona estas propiedades físicas con la temperatura. En el caso de los gases ideales, por ejemplo, la ecuación sería $PV = nRT$ ⁴⁹, que es la ley de los gases ideales.

A mediados de siglo, Helmholtz y lord Kelvin encontraron la equivalencia entre calor y trabajo, lo que implica que la realización de un trabajo sobre un sistema tiene el mismo efecto que la adición de calor (y el consiguiente aumento de temperatura). En definitiva, ambas son formas equivalentes de transferir la energía a un sistema. Si en un sistema la energía no varía al realizar trabajo sobre él, es que se desprende el equivalente en calor. Este es, en resumen, el primer principio de la termodinámica, que nos indica que la energía se conserva en cualquier interacción entre un sistema y su entorno, aunque no pone limitaciones a las maneras de intercambio de energía térmica y mecánica.

En 1824, Carnot señaló que los intercambios de energía se producen, en conjunto, en una dirección determinada. La explicación del funcionamiento de una máquina térmica (dispositivo que produce trabajo de forma continua mediante un cuerpo caliente que actúa como fuente de calor y un cuerpo frío que lo absorbe) implica que cuando la transferencia de calor se realiza del cuerpo caliente al frío, la máquina realiza trabajo mientras que para

⁴⁸Guzmán, Ricardo: *Op. cit.* p. 154.

⁴⁹ P: Presión absoluta; V: Volumen; n: Moles de gas; R: Constante universal de los gases ideales; T: Temperatura absoluta.

que ocurra lo contrario, necesitamos realizar un trabajo mecánico sobre el sistema. El segundo principio de la termodinámica nos dice que el calor no puede fluir de un cuerpo frío a un cuerpo caliente sin que se realice trabajo. Por lo tanto, si no puede haber interacción con el entorno, las partes internas de un sistema tienden a igualar sus temperaturas para alcanzar un estado de equilibrio. Hay una propiedad termodinámica que mide lo cerca que se encuentra un sistema del equilibrio y, por lo tanto, del desorden interno perfecto: la entropía. La entropía en un sistema aislado (y el Universo en su conjunto lo sería), solo puede aumentar hasta que ya no pueda haber cambios internos de ninguna clase y se produzca la “muerte térmica del Universo”. Sin embargo, la entropía de un sistema (el cuerpo humano o una máquina, por ejemplo) puede disminuirse mediante acciones externas que aumentarían la entropía del entorno para lograr la disminución local de la misma. Esto tiene una implicación muy importante para el tema que nos ocupa: los procesos macroscópicos deben ser irreversibles para no violar el segundo principio de la termodinámica, aunque los microscópicos sí puedan ser reversibles⁵⁰.

Podemos afirmar que, si bien el impulso de las ciencias físicas en general y de la termodinámica en particular vino de su relación con la industria y tiene una base pragmática, los científicos nunca abandonaron el impulso original que mueve a la ciencia: el intento de entender qué es y cómo funciona la naturaleza. La termodinámica, enriquecida después por la interpretación atomista y mecanicista llevará tanto a físicos como a filósofos a plantear nuevas formas de acercarse al problema del conocimiento y de entender cuál será el destino mismo del Universo⁵¹. Veremos, en especial, las consecuencias que estas nuevas explicaciones en la concepción del tiempo para una serie de autores que resultan de especial relevancia.

⁵⁰Alonso, Carlos J.: *Op. cit.* pp. 393-396.

⁵¹Guzmán, Ricardo: *Op. cit.* pp. 170-171.

4. LOS PROBLEMAS DE LA TEORÍA DEL TIEMPO EN EL SIGLO XIX

4.1 Helmholtz

Puede parecer que el desarrollo de la filosofía de la ciencia y de las matemáticas se fraguó específicamente en los departamentos y laboratorios desde los que trabajaron los primeros mecánicos analíticos y que los departamentos de filosofía solo tuvieron una relevancia secundaria. Vamos a utilizar la figura de Helmholtz para comprobar cómo desde el ámbito más estrictamente filosófico representado por el pensamiento de Immanuel Kant, se puede establecer un nexo que nos llevará hasta el desarrollo que desembocará en el siglo XX. Si bien es cierto que se parte de la descripción kantiana de la epistemología y la gnoseología, enseguida se hace evidente que las soluciones que propone el de Königsberg no servirían para dar respuesta a los problemas planteados y que, a tenor de los nuevos desarrollos en el ámbito de la ciencia, estas soluciones debían ser replanteadas. Pasaremos a ver cómo Helmholtz reconsidera la filosofía kantiana – aunque no lo haga desde un departamento de filosofía– y lo que supondrá para la concepción del tiempo.

Si partimos desde la aceptación de la ley de inercia, que asocia el movimiento rectilíneo uniforme con la noción de fuerza y que queda enunciado de la siguiente manera: “Todos los cuerpos perseveran en su estado de reposo o de movimiento uniforme en línea recta, salvo que se vean forzados a cambiar ese estado por fuerzas impresas⁵²”. Podemos afirmar que, dentro de la estructura propuesta por Kant en la *Crítica de la Razón Pura* (1781), las bases para definir el movimiento rectilíneo uniforme se pueden encontrar en la estética trascendental, mientras que los elementos dinámicos, aquellos referentes a las fuerzas, se derivan de la categoría de causalidad y, por lo tanto, deben tener una justificación en base a otros principios, desarrollados por Kant en la analítica trascendental. La deducción trascendental de los conceptos de espacio y de tiempo tiene como finalidad establecer las condiciones de conocimiento a priori en una estructura y es, en ese sentido, más básica que la deducción trascendental de las categorías porque, a diferencia de esta última, permite responder a la siguiente pregunta: ¿Qué garantía tenemos de que los principios a priori derivados de los conceptos deducidos

⁵²Newton, Isaac: *Op. cit.*, p.41.

trascendentalmente sean válidos bajo cualquier circunstancia, es decir, en cualquier lugar y en cualquier momento?⁵³ En realidad, eso solo lo garantizan en sentido estricto las formas puras de la sensibilidad: el espacio y el tiempo. En cuanto a las categorías, al menos las categorías llamadas dinámicas por Kant (causalidad y substancia), se refieren a relaciones entre realidades, que es lo mismo que decir “porciones de materia” o “existencias en el tiempo”. Estas realidades definen posiciones, llenan el espacio y el tiempo, es decir, determinan el espacio y el tiempo poniendo límites a lo que, de otra manera serían *quantos* continuos vacíos. De esta manera, espacio y tiempo son prerequisites para el establecimiento de las relaciones definidas por las categorías. Se puede establecer la distinción entre conceptos matemáticos y regulativos, siendo el tiempo al primero de ellos.

Cuando Kant habla de las “condiciones de posibilidad de la experiencia” no queda claro si se está refiriendo al proceso mental, a nuestra práctica científica o si está estableciendo una relación engañosa entre ambas. Lo que ocurre es que cuando hablamos de geometría, cronometría o de cinemática (que serían las ciencias fundamentales de medición a priori), nos estamos refiriendo a las condiciones de posibilidad del conocimiento científico, de la formulación matemática de leyes causales. Siguiendo el mismo razonamiento que en la deducción de las formas de la sensibilidad y las categorías, la geometría y la cronometría hacen, combinadas, que surja la cinemática. Los axiomas de la cronometría son muy básicos: el tiempo tiene una dimensión, es continuo, sus partes no son simultáneas... De esta manera, a través de la geometría y la cronometría, se hace posible la cuantificación del movimiento. Ya hemos visto que para Euler la existencia de estas ciencias suponía la existencia real del espacio y del tiempo. Frente a él, Kant propone que deben ser inherentes a la sensibilidad humana ya que de otra manera no cabría explicar nuestro conocimiento a priori de estas formas puras de la sensibilidad. A Kant le faltaría explicar cómo es posible cuantificar espacio, tiempo y movimiento; es decir, cómo se podrían formular aritméticamente las leyes de la naturaleza a partir de la cuantificación de estos conceptos.

Es aquí donde entra la figura de Hermann von Helmholtz, quien fue capaz de desarrollar una epistemología de corte naturalista en la que aglutinó sus trabajos en

⁵³Hyder, David: “Time, Norms, and Structure in Nineteenth-Century Philosophy of Science”, en *The Oxford Handbook of the History of Analytic Philosophy*, Oxford, Oxford University Press, 2013, Cap. 6, p. 3.

fisiología, matemáticas, física y medicina. Influido por la epistemología neokantiana y por el empirismo, Helmholtz desarrolla su pensamiento dentro de la mecánica racionalista combinando esta con una epistemología empirista. La lectura que se hace desde posturas fisiologistas en un primer momento de la gnoseología kantiana es claramente desacertada, por cuanto incide en un error del cual ya el propio Kant había advertido: los principios a priori no pueden estar ligados a las inclinaciones fisiológicas de los organismos humanos. Para la escuela neokantiana en la que dio Helmholtz sus primeros pasos, Kant estaba describiendo la estructura innata de la percepción humana. Los errores de Helmholtz se pueden resumir en que afirmó el carácter empírico de la geometría (que para Kant era a priori y, por lo tanto, condición de posibilidad del conocimiento y previo a toda experiencia) y, en segundo lugar, en que no supo conectar las leyes de la geometría con las leyes de la física, en particular con la ley de inercia. Pero ya, desde un primer momento, Helmholtz es consciente de que, coincidiendo con Kant:

Estos conceptos físicos se derivan en parte del simple hecho de que no hay en absoluto percepciones que no estén producidas por una auto-actividad y en parte de las propias percepciones empíricas determinadas individualmente. El conjunto de las primeras de ellas produce las ciencias naturales puras o generales (teoría del tiempo, geometría, mecánica pura), y el conjunto de las segundas producen la física teórica. La característica común de los conceptos físicos generales sería que ellos mismos y sus consecuencias son la base de toda intuición natural; por consiguiente, son, en este sentido, la fórmula general y necesaria de la intuición natural, por tanto, la certeza de sus proposiciones es absoluta, mientras que la certeza de los conceptos naturales específicos solo se extiende para afirmar que todos los hechos conocidos hasta el momento coinciden con ellos. Además, los conceptos generales, derivados únicamente de la posibilidad de cualquier intuición natural, podrían no limitar la posibilidad de cualquier combinación empírica de percepciones, por ejemplo, ningún hecho empírico o ley podría ser derivable de ellos, más bien pueden producir únicamente una regla para nuestras explicaciones⁵⁴.

Pero hay una diferencia con respecto a la teoría kantiana que es crucial: Helmholtz define las propiedades métricas en función del desplazamiento de los cuerpos en el espacio mientras Kant lo hace mediante la composición de partes del espacio. Así, en vez

⁵⁴Helmholtz, Hermann von: "On General Physical Concepts", en S. Luft (ed.) *The Neo-Kantian Reader*, London, Routledge, 2012, p. 127.

de definir la geometría como una ciencia de las propiedades que debe tener el espacio que contiene cuerpos la define como la ciencia de las propiedades de un espacio que contiene cuerpos rígidos en movimiento y, dado que este concierne al espacio y al tiempo, concierne a realidades que se encuentran dentro de lo que Kant llamó percepción. De esta manera, partiendo de la percepción y del cambio material llegamos hasta los conceptos de espacio y tiempo.

Unos 20 años después de proponer esta fundamentación conceptual, vuelve a definir las magnitudes geométricas de manera cinemática pero, debido al avance de la geometría, se abre la posibilidad de trabajar con desplazamientos no euclidianos de cuerpos rígidos. Por supuesto, cambiar las reglas de la geometría supone definir la línea recta de acuerdo a ese nuevo sistema y, en consecuencia, definir el desplazamiento rectilíneo de otra manera. En cuanto al estatuto de la geometría, argumenta que sus proposiciones son autojustificativas, no se pueden comparar con una norma externa porque, en realidad, son “formas ideales”. Sin embargo, piensa en un primer momento que, sin la posibilidad de llevar a cabo las traslaciones de los instrumentos de medida, la ciencia sería imposible, asumiendo que la geometría euclídea es la única capaz de fundamentar la cuantificación del espacio. Posteriormente, con el descubrimiento de las posibilidades de las geometrías alternativas, esta postura termina cambiando. Lo que sí sigue manteniendo es que las relaciones métricas están íntimamente unidas a la materia y al tiempo. El significado de la geometría ha de estar, pues, extendido en el tiempo y la imagen de esa extensión en el tiempo en la imagen del movimiento futuro.

Poco más tarde, Helmholtz publica el *Origen y Significado de los Axiomas Geométricos* (1870). Hasta entonces, como ya hemos visto, argumentaba contra Kant que la geometría es una ciencia cinemática y no meramente espacial pero no había entrado en la discusión de si era inductiva o contingente. Al descubrir que las geometrías pseudoesféricas eran consistentes con sus axiomas de medida supuso que, si hubiésemos crecido con el juego de estimulaciones apropiado, podríamos haber optado por una geometría de ese tipo en vez de por la euclídea. La geometría, por lo tanto, quedaba convertida en un refinamiento lógico de generalizaciones inductivas, construido con el fin de hacer una ciencia llamada física. Ahora bien, ¿qué supondría ese cambio de geometría? Nosotros podríamos elegir cualquier geometría arbitrariamente, pero eso requeriría cambiar la ley de inercia. Así que tenemos dos opciones: o bien construimos una geometría proyectada temporalmente, es decir, cinemática, basada en nuestras

observaciones; o estipulamos arbitrariamente una geometría y cambiamos consecuentemente la ley de inercia. Otra opción, desde el marco explicativo kantiano, sería la de interpretar la geometría euclídea como una doctrina conceptual “trascendental”, es decir, definiendo el movimiento del cuerpo rígido en términos euclídeos para que todo y solo aquello que se ajuste a las leyes del desplazamiento euclidiano pueda ser llamado rígido. Pero para un kantiano esto tendría un precio muy alto, ya que supondría admitir que las proposiciones de la geometría son analíticas, pues se siguen de la definición de movimiento del cuerpo rígido dado en los términos de la geometría analítica, es decir, en términos de pura teoría cuantitativa.

4.2 Boltzmann

Ya hemos visto que el desarrollo conceptual de la termodinámica supuso una nueva aproximación a la explicación física. No obstante, las interpretaciones sobre su funcionamiento fueron diversas; Clausius intentó relacionarla con una teoría de la configuración molecular mientras que Maxwell y Boltzmann resaltaron el carácter esencialmente estadístico de la segunda ley de la termodinámica que, según ellos, era una representación del comportamiento de un número muy grande de moléculas⁵⁵.

La propuesta de Boltzmann parte de la necesidad de conciliar lo enunciado en el primer y segundo principios de la termodinámica. Recordemos que el primero establecía que la energía dentro de un sistema debe permanecer constante y que el trabajo recibido por el sistema se debe equilibrar con el calor desprendido. El segundo afirma, básicamente, que un sistema en equilibrio avanza hacia la entropía máxima, estableciendo la irreversibilidad general de los procesos termodinámicos. Boltzmann retoma el paradigma atomista para explicar la integración de los dos principios. Asumiendo la teoría cinética de los gases, llega a la conclusión de que la temperatura es consecuencia del movimiento y de los choques producidos por los átomos y moléculas, es decir, de la presión y de la energía cinética de los mismos. Dado el enorme número de partículas que componen el sistema, resulta imposible hacer un seguimiento exhaustivo de cada trayectoria dentro del sistema, pero la entropía es resultado del conjunto de todas ellas, es un valor que representa la probabilidad⁵⁶. En palabras de Feynman,

⁵⁵Harman, P. M., *Op. cit.*, pp.86-87.

⁵⁶Mataix, Carmen: “La entropía y la flecha del tiempo”, en José Luis Gonzáles (ed.): *El taller de las ideas*, México DF, Plaza y Valdés, 2005, pp. 219-222.

si efectuamos el experimento dentro de un recipiente que sólo contenga cuatro o cinco moléculas de cada clase en su interior, las moléculas, con el paso del tiempo, acabarán mezclándose. Pero, en este caso, es plausible suponer que, con un poco de paciencia y debido a las colisiones perpetuas e irregulares de estas moléculas, acabaremos viendo –y no necesariamente después de millones de años– cómo accidentalmente las moléculas vuelven a una posición similar a la de su estado inicial, al menos en el sentido de que si colocásemos una barrera en medio de la caja, todas las moléculas blancas estarían de un lado y las azules del otro. No es imposible. Sin embargo, los objetos con los que trabajamos normalmente no tienen cuatro o cinco moléculas blancas y azules. Tienen cuatro o cinco millones de millones de millones. Así pues, la aparente irreversibilidad de la naturaleza no procede de la irreversibilidad de las leyes fundamentales de la física; surge del hecho de que si se parte de un sistema ordenado y tienen lugar las irregularidades de la naturaleza (las colisiones de las moléculas), el sistema cambia en un único sentido⁵⁷.

Desde este punto de vista, resultaría que cuanto más alta sea la entropía, más probable es que el sistema se encuentre en ese estado y, en consecuencia, mayor es su estabilidad. Un sistema con baja entropía, por contra, sería un sistema muy inestable. La probabilidad se incorpora de forma definitiva a la explicación científica. Si pensamos en qué ocurriría en el caso de dos sustancias que se mezclan en términos de partículas que se mueven rápida o lentamente, el proceso se describiría tal que así:

Supongamos que en un recipiente tenemos separadas de un lado agua transparente y de otro, agua de color azul por haberla mezclado previamente con tinta. Si con suma delicadeza levantamos la separación, el agua al principio se mantiene transparente de un lado y azul de otro. Pero si esperamos un poco veremos cómo gradualmente ambas aguas se van mezclando hasta conseguir uniformemente un color azul sucio. Si a continuación nos quedamos observando el color del contenido del recipiente no vamos a ver cómo las dos aguas vuelven a separarse. Es cierto que podría hacerse algo para conseguir el color azul inicial. Por ejemplo, podría calentarse el agua hasta evaporarla para condensarla en otro lugar; recoger a continuación el tinte azul y disolverlo en la mitad del agua y ponerlo todo como al principio. Pero mientras estamos siguiendo este proceso, nosotros mismos estamos causando fenómenos irreversibles en otro lugar. Por sí misma la separación no

⁵⁷Feynman, Richard, *El carácter de la ley física*, Barcelona, Alberto Bosch, 1983, pp. 96-97.

ocurre⁵⁸.

Con la situación descrita en este experimento, en el que el proceso se pretende explicar gracias a la interacción de partículas de dos líquidos en movimiento, podemos afirmar que la diferenciación inicial (que, por ejemplo, se daba también en el caso del famoso demonio de Maxwell⁵⁹) tiende a desaparecer para dar paso a una homogeneización progresiva, hacia un estado de entropía máxima. Así, la situación inicial es un sistema con una alta inestabilidad y, como consecuencia, poco probable (tan poco probable como que necesita de la mano del hombre o de un demonio para producirse). Si introducimos el concepto de orden para describir este estado, lo deberíamos calificar como ordenado y heterogéneo. La entropía máxima representaría, por contra, el máximo grado de desorden, de homogeneidad, de mezcla, de indiferenciación y equilibrio. La evolución espontánea se produce, pues del orden al desorden, de lo menos probable a lo más probable.

¿Cómo se explica la convivencia del primer y el segundo principio de la termodinámica? La conservación de la energía microscópica se traduce a escala macroscópica por la equivalencia entre las diversas formas que reviste para nosotros la energía: calor describiendo movimientos desordenados de los átomos, energía mecánica correspondiendo a desplazamientos colectivos de los constituyentes, energía eléctrica asociada a una separación parcial de las cargas en el espacio, energía química que procede del agrupamiento de los átomos en moléculas diferentes...⁶⁰ De esta forma, se explica el porqué de este desorden tan estable: en el equilibrio, el sistema tiene las mismas posibilidades de ir hacia un lado que hacia el otro y no evoluciona hacia ninguno concreto. Ahora bien, en las situaciones muy diferenciadas ocurre lo contrario:

Lo que hemos llamado formas degradadas de energía no será otra cosa que formas

⁵⁸Feynman, Richard, op. Cit., pp. 95-96.

⁵⁹El demonio de Maxwell es “un ser cuyas facultades están tan desarrolladas que podría seguir la trayectoria de todas las moléculas. Esta criatura, con unos atributos que no se saldrían de nuestro dominio finito, sería capaz de hacer lo que actualmente nos es imposible realizar a nosotros mismos. Se ha visto que las moléculas encerradas en un recipiente lleno de aire a temperatura uniforme se mueven con velocidades que no son uniformes en absoluto... Supongamos ahora que se divide el recipiente en dos mitades, A y B, mediante una pared en la que se haya abierto un pequeño orificio, y que este ser, que puede ver las moléculas una a una, abre y cierra el agujero de tal manera que no deja pasar de A a B más que a las más rápidas y, de B a A, a las más lentas. Procediendo de este modo, sin consumir trabajo, eleva la temperatura de B y baja la de A, en contradicción con la segunda ley de la termodinámica.” Maxwell, James Clerk: *Theory of heat*, Santa Fe, Courier Dover Publications, 2001, p. 328.

⁶⁰Balian, Roger: “Le temps macroscopique”, en E. Klein y M. Spira (eds.), *Le temps et sa flèche*, París, Frontières, 1995, p. 208.

probables de energía, o mejor dicho, será energía que se distribuye entre las moléculas de la manera más probable. Pensemos en una cantidad de bolas blancas a las que se añade una cantidad diferente de bolas idénticas pero negras. Al principio habrá en un lado sólo bolas blancas, y en el otro sólo negras. Mezclémoslas con las manos o expongámoslas durante un tiempo relativamente largo a otra influencia externa que altere sus posiciones relativas, después de algún tiempo las encontraremos totalmente mezcladas. No ocurre otra cosa cuando tenemos un cuerpo que está más caliente que su medio; tenemos un gran grupo de moléculas que se mueven rápidamente en medio de grupos de moléculas que se mueven más lentamente. Si ponemos el cuerpo caliente en contacto directo con un medio más frío, se establece una distribución de velocidades que corresponde a las leyes de la probabilidad. La temperatura se iguala⁶¹.

Todo esto parece indicar que, de alguna manera, hay también algo así como un principio de conservación de la entropía ya que para introducir orden en una parte determinada del universo deberemos inducir desorden en algún otro lugar. El planteamiento que hace Boltzmann tiene la ventaja de explicar el segundo principio de la termodinámica en términos puramente mecánicos que daban cuenta del movimiento de los átomos. Sus teorías no fueron bien recibidas ya que, en un primer momento, el aumento de la entropía no era considerado como una tendencia universal sino como un hecho de ciertos sistemas que no tenía aplicación general. Tampoco el recurso al atomismo fue bien recibido.

En la segunda mitad del siglo XIX, época de la eclosión de la física estadística, la irreversibilidad, la disipación eran hechos de evidencia. Introducir, como Maxwell o Boltzmann, hipótesis atomistas a fin de abastecer de explicaciones teóricas a fenómenos establecidos empíricamente provoca las objeciones de la mayoría de los sabios y filósofos. En particular, estos primeros trabajos de mecánica estadística postulaban la reversibilidad del movimiento de los átomos (no observados aún), lo que contrariaba el sentido común de los físicos, puesto que todos los fenómenos conocidos a escala humana eran poco o casi irreversibles⁶².

Sin embargo, la explicación a través de un modelo estadístico es mucho más satisfactoria en sistemas complejos por lo que este se acabará imponiendo a la explicación

⁶¹Boltzmann, Ludwig: *Escritos de mecánica y termodinámica*, Madrid, Alianza, 1986, p. 67.

⁶²Bailan, Roger, *Op. cit.*, p. 176.

mecánica tradicional. Pero este cambio de perspectiva trae también consecuencias en la concepción de algunos conceptos fundamentales. Veamos qué ocurre en el caso del tiempo.

Para la mecánica es posible conocer las condiciones iniciales exactas y también pronosticar el estado futuro de un sistema. Esto podía ser posible en sistemas muy simples, pero en sistemas complejos resulta mucho más difícil (ya vimos la dificultad que representó el problema de los tres cuerpos) si no imposible. De hecho, para la termodinámica no podemos saber las condiciones iniciales del sistema; nos tenemos que conformar con saber que se pasa del orden al desorden. Pero resulta que lo habitual en la naturaleza son los sistemas complejos en los que solo una ciencia basada en la probabilidad nos puede aportar soluciones teniendo en cuenta dos cuestiones importantes: la existencia de una dirección temporal y, como consecuencia de ella, la irreversibilidad de los procesos⁶³.

La mecánica clásica puede utilizar el equilibrio para fundamentar el principio de inercia, la simetría o la ausencia de razón suficiente (en contraposición a Leibniz). La ventaja que nos ofrece es que nos describe una naturaleza donde funciona la reversibilidad. Sin embargo, la experiencia nos empuja hacia una ruptura de la simetría que conduce a los fenómenos manifiestamente en una dirección determinada, dando lugar a lo que se ha venido a llamar “la flecha del tiempo” subrayando la existencia de un sentido privilegiado en el transcurrir de los fenómenos. Se ha de comenzar por establecer la diferencia con el espacio, una de cuyas características fundamentales es la ausencia de un sentido o dirección preferente. Con respecto al tiempo se debe tener en cuenta:

- Que es reconocido de manera inequívoca por nuestra conciencia.
- Que es igualmente reconocido por nuestra razón. Lo cual equivale a decir que la inversión de la flecha haría del mundo un contrasentido.
- Que solo aparece en la física cuando se estudia la organización de un gran número de individuos. En este caso la flecha indica el aumento progresivo del elemento azar⁶⁴.

⁶³Mataix, Carmen, *Op. cit.*, pp. 225-227.

⁶⁴Eddington, Arthur Stanley: *La naturaleza del mundo físico*, Buenos Aires, Sudamericana, 1945, p. 45.

La irreversibilidad es una consecuencia de la existencia de la flecha del tiempo. Si pensamos en dos maneras de medir un intervalo de tiempo como un reloj de arena y una vela (suponiendo que el tiempo que tarda en consumirse la vela es el mismo que la arena tarda en caer en la parte inferior del reloj), resulta evidente que el reloj podrá utilizarse de forma consecutiva tantas veces como se quiera mientras que la vela tiene un solo uso, quedando inutilizable al final del proceso. Lo que ocurre es que la vela se puede considerar como una fuente de energía organizada que pierde la posibilidad de recuperar el estado inicial. La diferencia entre reversibilidad e irreversibilidad es clarificada por Max Planck con un ejemplo que pasamos a desarrollar a continuación:

Supongamos que sumergimos en un recipiente de agua fría un trozo de hierro calentado a muy elevada temperatura. El calor del hierro se transmitirá al agua hasta que ésta y aquél tengan igual temperatura. Esto es lo que se denomina equilibrio térmico, que tiene lugar en todos los casos si no existe nada que impida la conducción del calor.

Tomemos ahora dos tubos verticales de vidrio abiertos en las extremidades superiores, y que tienen las extremidades unidas por un trozo de goma. Si introducimos un líquido pesado, como el mercurio, en el interior de uno de los tubos, el líquido pasa a través de la acodadura de goma hacia el segundo tubo, y se eleva en él hasta que el nivel de las superficies en ambos tubos es el mismo. Supongamos ahora que elevamos uno de los tubos; entonces el nivel se modifica, pero el líquido vuelve a descender inmediatamente cuando colocamos los tubos en la posición primitiva. Entre este ejemplo y el del trozo de hierro sumergido en el agua hay innegable analogía. En ambos casos cierta diferencia provoca un cambio. En el caso del tubo que elevamos con respecto al otro se produce un cambio de nivel, y en el caso del hierro y el agua existe, en el momento de la inmersión, una diferencia entre las temperaturas. Si en ambos casos permitimos que la masa total lleve un tiempo suficientemente largo en reposo, las diferencias desaparecerán, y se obtendrá una condición de equilibrio⁶⁵.

Planck plantea posteriormente las diferencias entre los ejemplos que, hasta el momento, parecen tener muchos puntos en común. La acción del líquido dentro de los tubos está definida por las leyes de la dinámica mientras que la del trozo de hierro sumergido sigue las leyes estadísticas que regulan el intercambio de calor. La razón para que esto ocurra

⁶⁵ Planck, Max: *¿A dónde va la ciencia?*, Buenos Aires, Losada, 1941, pp. 195-196.

en el caso del metal pesado es consecuencia del primer principio de la termodinámica, pues si en vez de compensarse las alturas, el nivel del más alto subiese todavía más, deberíamos encontrar alguna fuente de energía que realizase tal trabajo, lo cual contradice el primer principio de la termodinámica. En el caso del agua y del hierro, al ser el calor que se transmite de uno a otro una forma de energía, la única exigencia que existe es la de que la cantidad de calor cedida por uno sea la misma que la cantidad absorbida por el otro, bien sea del agua fría al hierro caliente o al revés.

Si nos fijásemos detenidamente en lo que ocurre dentro del tubo, encontraríamos que el líquido que cae se mueve cada vez más rápido a medida que desciende, de manera que sobrepasaría, debido a la inercia, el punto de equilibrio, estando en ese momento en una posición situada más debajo de la que le correspondería en el equilibrio. Si pudiéramos eliminar la fricción que presentan las paredes del tubo con el líquido nos encontraríamos con que el metal oscila de manera continua hacia arriba y hacia abajo sin pararse nunca en la posición de equilibrio. Nos encontraríamos pues ante un proceso reversible.

En el caso del calor las condiciones son completamente diferentes. Cuanto más pequeña sea la diferencia de temperatura entre el hierro caliente y el agua, tanto más lenta será la transmisión del calor desde el uno a la otra [...]. En este caso no hay oscilación del calor entre los dos cuerpos; la corriente es siempre en una dirección, y, por tanto, representa un proceso *irreversible*⁶⁶.

A partir de este planteamiento surge la pregunta de cómo es posible que una dinámica a escala microscópica que es reversible engendre cuando se traslada a la escala macroscópica procesos irreversibles. Es el salto que se da desde el atomismo hasta la explicación probabilística la que obliga a plantear esta cuestión, que ya fue esbozada por Loschmidt y Kelvin. Otra pregunta que puede surgir es la de las diferencias que existen entre los procesos reversibles e irreversibles si es cierto que todas las cosas están sometidas a la flecha del tiempo. La respuesta podría ser que la entropía y la flecha temporal se manifiestan de forma mucho más evidente en aquellos fenómenos que “tienen historia”⁶⁷. A partir de aquí surge otro interrogante al que Boltzmann encontrará una respuesta que pudiera parecer sorprendente pero que encaja perfectamente con su teoría. La entropía del universo tiende a aumentar; sin embargo, ese aumento no es constante,

⁶⁶Planck, M.: *Op. cit.*, pp. 197.

⁶⁷ Mataix, Carmen, *Op. cit.*, pp. 229-230.

sino que puede intercalar aumentos con disminuciones. Bien, ¿qué ocurre en el momento en el que el universo se encuentra en un periodo en el que la entropía está disminuyendo? En este caso sería lícito hablar de un sentido opuesto al tiempo positivo, es decir, la flecha del tiempo correría en sentido inverso. Otra cosa que ocurre es que el universo no es un sistema uniforme, sino que está compuesto por subsistemas menores cuya entropía puede aumentar o disminuir en cada lugar de manera distinta, aunque interdependiente en su conjunto. De esta forma, además de poder establecer un sentido del tiempo positivo y uno negativo en función del aumento o disminución de la entropía, debemos hacerlo de manera local, es decir, dependiente del subsistema. Podrían, por tanto, convivir tantos tiempos locales como subsistemas tenga el universo.

El primero que se atrevió a obtener esta conclusión fue Ludwig Boltzmann. Su concepción de la alteración del sentido del tiempo, definido para cada sección por procesos estadísticos, representa una de las reflexiones más penetrantes acerca del problema del tiempo. Los filósofos han intentado derivar las propiedades del tiempo de la razón; pero ninguna de sus concepciones se compara con este resultado que un físico obtuvo razonando acerca de las implicaciones de la física matemática. Como en tantos otros puntos, se puso aquí de manifiesto la superioridad de una filosofía basada en los resultados de la ciencia. No hay una necesidad lógica para que exista un sentido único del tiempo total; el que haya solo un sentido del tiempo, o que los sentidos del tiempo se alternen, es algo que depende de la forma de la curva de la entropía del universo.

Boltzmann ha hecho ver muy claramente que la alternación del sentido del tiempo no representa un absurdo. Nuestro sentido del tiempo lo refiere a aquella sección de la curva de entropía en la cual estamos viviendo. Si sucediese que “más tarde”, después de alcanzar un estado de alta entropía y de permanecer allí largo tiempo, el universo llega a un descenso prolongado de la curva de entropía, entonces, para esa sección, el tiempo tendrá el sentido opuesto: los seres humanos que vivieran en esta sección considerarían como tiempo positivo la transición hacia una entropía más alta y, por consiguiente, su tiempo fluiría en sentido opuesto al nuestro⁶⁸.

Lo que hace Boltzmann, en definitiva, es atreverse a aplicar hasta sus últimas consecuencias las implicaciones de los principios de la termodinámica, que en lo referente

⁶⁸Reichenbach, Hans: El sentido del tiempo, México DF, Plaza y Valdés, 1988, pp. 186-188.

al tiempo tiene derivaciones que, en un primer momento pueden parecer chocantes por resultar lejanas a la experiencia del tiempo que se presenta ante nosotros. Sin embargo, al asociar el tiempo a la entropía obtenemos unas perspectivas novedosas acerca ese concepto que llegarán, con el desarrollo posterior, a ofrecer unas lecturas acerca del funcionamiento del Universo realmente fecundas.

4.3.Poincaré

La figura de Henri Poincaré (1854-1912) surge como una de las más representativas del avance de la ciencia del siglo XIX. Su educación superior corre a cargo de la famosa Escuela Politécnica francesa, centro de formación del que surgen no solo científicos sino también figuras de vital importancia en la vida política y militar de Francia, donde aprende no sólo matemáticas y mecánica sino también el valor de la aplicación práctica: se trataba de unir pensamiento y acción⁶⁹. En un primer momento, su vida laboral la desarrolla como ingeniero pero pronto, viendo reconocida su labor como matemático, pasa a formar parte de las más importantes instituciones la ciencia francesa de final de siglo donde debe tomar decisiones que, como veremos, influyen en sus intereses teóricos. Si bien es más conocido por su labor en el ámbito de las matemáticas, podemos decir que sus intereses van desde la geometría a la filosofía pasando por la física matemática, a la que aporta una perspectiva llena de profundidad y originalidad. Su influencia es enorme y, junto a otras figuras de su tiempo como la de Lorentz (con quien comienza una relación intelectual muy fecunda), llevará a la física hasta los límites de sus posibilidades.

Una de las mayores preocupaciones de la física del siglo XIX fue la de exponer las características del éter y explicar el papel que jugaba en toda la variedad de fenómenos sobre los que la ciencia era capaz de teorizar. Ya hemos visto que el intento de Maxwell por buscar una base común al electromagnetismo, la mecánica y la óptica, necesitaba justificar de manera más sólida la relación entre la materia y el medio en el que se producían las interacciones: el éter. Para muchos matemáticos y físicos franceses, entre ellos Poincaré, la teoría de Maxwell adolecía de rigor matemático y se le achaca la falta de conexión entre sus partes, haciendo que la comunicación entre cada una de ellas se torne imposible, por lo que la arquitectura del sistema no resulta consistente en su conjunto. A pesar de las reticencias planteadas a causa de la incompletitud de la

⁶⁹ Galison, Peter: *Relojes de Einstein, mapas de Poincaré*, Barcelona, Crítica, 2005, p. 53.

explicación maxwelliana, se impone como la explicación más amplia de los fenómenos ópticos y electromagnéticos, así como de la existencia del éter electromagnético⁷⁰.

La postura de Poincaré ante la intención de extender los supuestos de la mecánica a todos los ámbitos de la física es clara: tratar de que cualquier explicación de los fenómenos se doblegue a la forma de proceder de la mecánica estableciendo analogías forzadas, supone adaptar la concepción de la naturaleza a la teoría en vez de explicarla, que es de lo que se trata. La utilización de analogías mecánicas ha podido ser fructífera desde el punto de vista del desarrollo puntual de cada ámbito, pero presenta un problema de índole filosófico que se muestra de manera clara cuando analizamos las teorías electrodinámicas que quedan condensadas en que “si el principio de acción mínima no puede ser satisfecho, no hay explicación mecánica posible. Si puede ser satisfecho, no solamente hay una explicación, sino un número ilimitado de ellas, de donde se sigue que, como hay una, debe haber un número ilimitado”⁷¹. El problema sería el de cuál de estas explicaciones elegir y bajo qué criterios. Lo que propondrá Poincaré es que no tiene importancia cuál de ellas utilicemos para fundamentar las leyes de la física; el único criterio será que, cualquiera que sea la elegida, sea simple y facilite la comprensión del fenómeno explicado. En realidad, como hemos anunciado, si hay una explicación mecánica, existen infinitas explicaciones mecánicas. Por lo tanto, se podría afirmar que los modelos mecánicos tienen un sentido convencional, muy alejado de la concepción de las teorías que proponían que los modelos reflejaban la estructura de la realidad tal cual era⁷².

El método matemático en el que primaban las formulaciones rigurosas basadas en definiciones precisas y demostraciones estrictamente lógicas no había conseguido las predicciones deseadas para numerosos sucesos astronómicos. Poincaré demostró que los métodos de aproximación utilizados hasta el momento no servían para hacer estos pronósticos de manera certera. Su enfoque se centra en aspectos que él mismo llamó cualitativos, apostando por un tratamiento geométrico de los problemas como alternativa al improductivo tratamiento analítico. Lo que Poincaré buscaba era una imagen que captara la fisonomía de la ecuación y del sistema físico que pretendía representar,

⁷⁰ Serra, Isabel y de Paz, María: “Poincaré and the Language of Physics in the 19th Century.” Fernández Duque, D. Et Al. (Eds.), *Estudios De Lógica, Lenguaje y Epistemología*, 2010, p. 270.

⁷¹ Poincaré, Henri: *Ciencia e Hipótesis*, Edición digital Biblioteca ILCE, p.136.

⁷² Serra, Isabel y de Paz, María: *Op. Cit.*, pp. 270-272.

aunando en un mismo procedimiento la abstracción matemática con la concreción que facilitase las predicciones. Está en las antípodas de la abstracción promovida por Euler, Laplace o Lagrange (quien, recordemos, pretende eliminar todo atisbo de geometría en su mecánica analítica). Por ejemplo, su aproximación al problema (planteado tiempo atrás pero no resuelto satisfactoriamente) de los tres cuerpos es el siguiente:

¿No cabía preguntar si uno de los cuerpos permanecerá siempre en una región dada de los cielos, o si igualmente podría alejarse indefinidamente, si la distancia entre dos cuerpos crecerá o disminuirá en el futuro infinito, o si en su lugar permanecerá para siempre acotada en ciertos límites? ¿No se podrían plantear mil cuestiones de este tipo que se resolverían de una vez si se entendiera cómo construir cualitativamente las trayectorias de los tres cuerpos?⁷³

Este nuevo método llamó la atención de la comunidad matemática y ganó el premio convocado para honrar el sesenta cumpleaños del rey de Suecia al responder a la cuestión del famoso problema de los tres cuerpos. La historia tras la concesión del premio es compleja, ya que la solución propuesta en un principio por Poincaré reafirmaba la imagen del Sistema Solar como sistema estable a través de su nuevo método cualitativo. Sin embargo, antes de la publicación del trabajo se detectó un error que ponía en tela de juicio los resultados obtenidos. En consecuencia, tuvo que rehacer los cálculos al darse cuenta del error cometido y lo que encontró mientras enmendaba los cálculos fue sorprendente. Básicamente, el artículo original proponía que el sistema propuesto de tres cuerpos tendía a alcanzar la estabilidad mientras que la reelaboración tenía como resultado unos patrones de movimiento tendentes a la inestabilidad, al caos, en cuanto se introducía en uno de los cuerpos algún cambio con respecto a las condiciones iniciales que se tomaban como punto de partida⁷⁴. La nueva trayectoria es descrita así en sus *Nuevos métodos de la mecánica celeste* (1899):

Cuando tratamos de representar la figura formada por estas dos curvas (las variedades estables e inestables) y a su número infinito de intersecciones, cada una correspondiente a un punto doblemente asintótico se forma una especie de enrejado, tejido o red con una malla infinitamente fina. Ninguna de las dos curvas se interseca a sí misma de nuevo, pero se dobla sobre sí misma de una manera muy

⁷³ Goroff: "Introduction", en *Poincaré, New Methods* (1993), p. 19, tomado de Poincaré, «Mémoires sur les courbes» [1881], pp. 376-377.

⁷⁴ Galison, P.: Op. Cit., pp. 67-82.

compleja para poder cortar todas las mallas un número infinito de veces. La complejidad de esta figura es asombrosa, y no voy a intentar dibujarla⁷⁵.

Poincaré encontró un número infinito de órbitas caóticas posibles, pero también demostró que la posibilidad de que, por ejemplo, un asteroide se encontrara en uno de esos regímenes inestables era prácticamente nula frente a la probabilidad de que su órbita se encontrara en un régimen estable. De esta manera, las fórmulas y datos que los astrónomos utilizan para calcular las efemérides pueden seguir siendo útiles, pero Poincaré ha ampliado las posibles relaciones subyacentes a la mecánica. «El verdadero objetivo de la mecánica celeste no es calcular las efemérides, porque para este propósito podríamos contentarnos con una predicción a corto plazo, sino establecer si la ley de Newton es suficiente para explicar todos los fenómenos⁷⁶».

Volvemos en este punto a retomar la discusión sobre el convencionalismo de las leyes de la ciencia. Estas leyes, así como sus axiomas y las verdades que estos implican, no tienen validez absoluta ya que no son más que una posibilidad de entre todas las posibles alternativas. Este conjunto de axiomas, leyes y verdades se han tomado, por convención, como la base sobre la que construir el conocimiento. A este convencimiento llegó Poincaré a través de sus investigaciones en torno a los fundamentos de la geometría. El uso que hizo de las geometrías no euclídeas le convenció de que la geometría euclídea no debe ser considerada como una verdad a priori y que sus axiomas, en realidad, son pura convención⁷⁷:

¿Es verdadera la geometría euclidiana? Esto no tiene sentido preguntarlo. Podemos también preguntar si el sistema métrico es verdadero, y si los viejos pesos y medidas son falsas; si las coordenadas cartesianas son verdaderas y las coordenadas polares falsas. Una geometría no puede ser más cierta que otra; únicamente puede ser más conveniente. Ahora bien, la geometría euclidiana es, y seguirá siendo, la más conveniente; primero, porque es la más simple, y no lo es sólo por nuestros hábitos mentales o por el tipo de intuición directa que tenemos del espacio euclidiano; es la más simple por sí misma, de la misma manera que un polinomio de primer grado es más simple que un polinomio de segundo grado; segundo,

⁷⁵ García, Antonio: “La pregunta que Poincaré no pudo contestar”, 2014, p. 14, tomado de Poincaré, «Méthodes nouvelles de la mécanique céleste». Vol. I, II, III. Gauthier-Villars et fils, París, Francia, Vol. I, 1892, Vol II, Vol III, 1899, p.1959.

⁷⁶ Poincaré, Henri: *Sur le problème des trois corps*, 1890, p.490.

⁷⁷ Serra, Isabel y Paz, María de: Op. Cit., pp. 272-273.

porque concuerda lo suficiente con las propiedades de los sólidos naturales, aquellos cuerpos que podemos comparar y medir por medio de nuestros sentidos.⁷⁸

La elección de la geometría a usar en cada caso estaría guiada por hechos experimentales, pero sujeta a la elección definida, básicamente, por la necesidad de simplicidad. De lo que se trata es, en cada caso, de elegir la geometría que nos resulta más conveniente para los fines planteados. Desde este punto de vista, todas las geometrías serían, en el fondo, equivalentes y no habría ninguna que se pudiera imponer sobre las demás de forma absoluta. Además, debemos tener en cuenta que las distintas geometrías son simplemente diferentes formas de representar relaciones entre las cosas. La labor del matemático sería la de encontrar la estructura de grupo de lo que puede ser alterado y escoger la representación que más convenga. Es la misma labor que tiene también el físico. Pero junto con lo que puede ser alterado aparecerán también algunos puntos fijos, a los que denominamos invariantes, y que se definen como aquellos fragmentos del mundo que quedan inalterables sea cual sea nuestra elección⁷⁹. Ahora bien, ¿es lícito trasladar estas consideraciones que hemos hecho con respecto al espacio geométrico al espacio físico? La geometría ha sido creada para estudiar las relaciones entre objetos en el espacio y sus propiedades. En particular, son los cuerpos rígidos quienes nos han llevado a una determinada concepción de la geometría ya que esta tendría como finalidad el estudio de los movimientos de estos cuerpos rígidos reales de una manera simplificada desde la que poder establecer relaciones de la forma más sencilla posible. Ahora bien, el espacio geométrico es muy distinto al espacio donde tienen lugar los fenómenos físicos; el primero es continuo, infinito, homogéneo e isótropo y no tiene una estructura previa, sino que toma la estructura de los cuerpos que le ocupan. Esta falta de estructura previa es la que abre la posibilidad de decidir, dependiendo del objeto de nuestro estudio, la geometría que mejor se adapta a su estudio. Poincaré defiende, pues, una concepción relacional del espacio. El espacio físico sería aquel en el que ocurren los fenómenos y que se opone al espacio geométrico. Poincaré, sin embargo, no trata el problema en espacio físico en sí, sino que establece un espacio representativo en el que se localizan los cuerpos y se presentan las sensaciones y que, a pesar de ser diferente a esa idealización llamada espacio geométrico, establece relaciones entre ambas. Nosotros no representamos los cuerpos en el espacio geométrico, pero razonamos como si estuvieran ahí localizados. Si esta

⁷⁸ Poincaré, Henri: *Op. cit.*, p.37.

⁷⁹ Galison, P.: *Op. Cit.*, pp. 82-90.

construcción la hacemos de manera que esté basada en las sensaciones adecuadas, lograremos que esta sea simple y adaptada a nuestros fines. De esta manera, Poincaré entiende que es imposible un espacio vacío, pues la representación del espacio siempre se da en relación a los objetos que contiene⁸⁰.

Una consecuencia práctica del convencionalismo es la necesidad de elección de un sistema de medidas que se adapte a las exigencias de la ciencia. En el momento histórico en el que se sitúa Poincaré, se está dirimiendo la cuestión de si se debería optar por una decimalización de todas las unidades de medida o si se debía imponer un sistema mixto. La decimalización del tiempo, que ya había sido propuesta por Laplace, cayó en saco roto y lo mismo ocurre con la división del círculo en partes de 100 grados defendida por el propio Poincaré durante su época como secretario del Bureau des Longitudes. Finalmente, las acciones destinadas a homogeneizar y racionalizar los distintos sistemas fracasaron en un mar de posiciones encontradas, de intereses enfrentados y de cálculos políticos. En este contexto, las reflexiones e investigaciones de Poincaré acerca de la naturaleza del tiempo toman forma en *La medida del tiempo* (1898), donde aborda la apremiante necesidad de encontrar un concepto del tiempo sobre el que construir técnicas para la medición de diferencias horarias entre lugares distantes con el fin de mejorar la precisión en la elaboración de mapas. La cuestión del tiempo no es, pues, una tarea meramente teórica, sino que pasa a tener una dimensión práctica y una importancia vital en el contexto social.

En *La medida del tiempo* se aborda en un primer momento el concepto psicológico de tiempo y la manera en que los fenómenos pasan a formar parte de la conciencia dentro de este orden temporal que nos es impuesto de forma interna. Prosigue Poincaré justificando la necesidad de crear un concepto científico de tiempo cuantificable que, además dé respuesta a dos preguntas fundamentales: “(1) ¿Podemos transformar el tiempo psicológico, que es cualitativo, en un tiempo cuantitativo? (2) ¿Podemos reducir a una misma medida hechos que ocurren en mundos diferentes?⁸¹” Poincaré se centra, en este escrito, en la segunda cuestión planteada y parte del hecho de que “no tenemos la intuición directa de la igualdad de dos intervalos de tiempo⁸²”. Los métodos de medida del tiempo

⁸⁰ Serra, Isabel y Paz, María de: Op. Cit., pp. 273-275.

⁸¹ Poincaré, Henri: “La medida del tiempo”, en *El valor de la ciencia*, Buenos Aires, Espasa-Calpe, 1947, p. 34.

⁸² Poincaré, Henri: *Op. cit.*, p. 34.

como los péndulos nos dan una mera aproximación, pues se ven influidos por una gran cantidad de variables imponderables. Ni tan siquiera el tiempo sideral considerado por los astrónomos nos puede servir en este caso, pero a Poincaré le basta con concebir un instrumento perfecto a pesar de que no pueda ser construido.

En la búsqueda de ese instrumento perfecto se pregunta cuál es el postulado implícito en la medida del tiempo. La igualdad de dos duraciones supone “que la duración de los fenómenos idénticos es la misma o, si se prefiere, que las mismas causas emplean el mismo tiempo en producir los mismos efectos⁸³”. Sin embargo, en la naturaleza no encontramos causas y efectos aislado y deberíamos reformar el postulado afirmando que “causas poco más o menos idénticas emplearán aproximadamente el mismo tiempo para producir poco más o menos los mismos efectos”. Al final, resulta que el tiempo acaba por ser definido de tal modo que permita la verificación de los principios de la física (la ley de gravitación y la de las fuerzas vivas), es decir, de forma que las leyes de la mecánica sean lo más simple posibles, lo que implica que no hay una manera mejor de medir el tiempo que otra, sino que hay maneras más cómodas que otras. Las afirmaciones así obtenidas han de ser “resultado de una convención⁸⁴”. Si todo es resultado de la convención, ¿sería posible una representación común que pudiera hacer encajar un número muy grande de mundos impenetrables entre sí? Sería imposible ya que supondría colocarse casi en la posición del Diablo de Laplace, pues supondría una inteligencia infinita capaz de ver y clasificar en su tiempo absolutamente todo. Ello supondría que todos los recuerdos son igualmente presentes para esa inteligencia, lo que supondría la inexistencia del tiempo para ella. En el fondo, es esto lo que intentamos cuando intentamos que todos los fenómenos encajen dentro del mismo marco y, como hemos visto, una definición así de simultaneidad es inaccesible para nosotros. Se impone, pues, la necesidad de buscar otra.

No podemos partir del tiempo psicológico, pues dos hechos psicológicos simultáneos no permiten separación para su análisis. Otra definición de simultaneidad podría ser la de reversibilidad. Así, dos hechos simultáneos serían aquellos en los que se puede invertir el orden de sucesión. Pero ¿qué entendemos por simultaneidad y por anterioridad? En principio, si un fenómeno es causa de otro, se considera anterior y si es anterior, es causa

⁸³ Poincaré, Henri: *Op. cit.*, p. 35.

⁸⁴ Poincaré, Henri: *Op. cit.*, p. 39.

suya. Nos encontramos entonces ante un círculo vicioso del que es difícil salir. De hecho, en realidad no podemos hablar de causa sino del resultado de un número infinito de causas dentro de las que buscaremos, por comodidad y simplicidad, la más conveniente para nuestras necesidades. Para aclarar la simultaneidad Poincaré toma dos ejemplos concretos: el de la velocidad de la luz y la determinación de longitudes. En cuanto al primero, el aceptar el postulado de la constancia de la velocidad de la luz nos permite establecer “una nueva regla para la investigación de la simultaneidad⁸⁵” con la condición de que las leyes astronómicas compatibles con la velocidad así postulada sean lo más simples posibles. En cuanto al método para establecer las longitudes utilizadas por los geógrafos, nos lleva directamente al problema de la medida del tiempo (con el que Poincaré se enfrentó durante años al frente de una comisión del Bureau des Longitudes). Debemos tener en cuenta dos cosas:

1. Las reglas aplicadas son muy variadas.
2. Es difícil separar el problema cualitativo de la simultaneidad del problema cuantitativo de la medida del tiempo, se sirva uno de un cronómetro o deba tener en cuenta una velocidad de transmisión como la de la luz, pues no se podría medir una velocidad semejante sin *medir* un tiempo⁸⁶.

En definitiva, la imposibilidad de intuir directamente la simultaneidad o la igualdad de dos duraciones conlleva que apliquemos ciertas reglas de forma involuntaria que no tienen carácter general ni riguroso y que podrían ser sustituidas por otras que son elegidas por su simplicidad y su comodidad, pero no por ser verdaderas en sentido estricto. En suma, la medida del tiempo, igual que la decisión de adoptar determinadas geometrías, tiene que resultar convencional. El tiempo ha dejado de ser una variable absoluta para transformarse en una medida adoptada en función de su conveniencia.

4.4. Duhem

Pierre Duhem se sitúa justo al final de ese período de tránsito que se encuentra a caballo entre los siglos XIX y XX. Podemos decir que Duhem es uno de los filósofos de la ciencia que más influirá en el desarrollo que esta especialidad alcanzará inmediatamente después de su muerte. Su obra más conocida, *La teoría física, su objeto y su estructura* (1914), introduce nociones como la de libertad, belleza o sentido común

⁸⁵ Poincaré, Henri: *Op. cit.*, p. 43.

⁸⁶ Poincaré, Henri: *Op. cit.*, p. 45.

en el ámbito de la ciencia⁸⁷. Entre los temas que desarrolla durante su trayectoria podemos encontrar la crítica al inductivismo de raíz newtoniana y al verificacionismo; en su vertiente positiva subraya el papel de las hipótesis y de las estructuras abstractas en la generación del conocimiento. Es frecuentemente asociado con el convencionalismo clásico defendido por Poincaré, es decir, un convencionalismo no absoluto que tiene como punto de partida la experiencia. Las teorías no revelan la verdadera naturaleza de la materia; no pueden ser verdaderas o falsas, sino que se limitan a ser convenientes o inconvenientes con respecto al mundo. Su postura como físico teórico fue la de considerar la energía como el elemento vertebrador de esta ciencia de forma que habría que extender la termodinámica no solo a la física sino también a la química. La teoría física no trata de explicar las leyes experimentales ni la realidad oculta más allá de la apariencia, sino que es un proceso con cuyo desarrollo:

- más aprehendemos que el orden lógico con el que ordenan las leyes experimentales es el reflejo de un orden ontológico,
- más sospechamos de las relaciones que establecen entre los datos de las observaciones corresponden a las relaciones reales entre las cosas⁸⁸,
- más sentimos que la teoría tiende a una clasificación natural⁸⁹.

De esta manera, se sitúa frente a Maxwell por interpretar que este no busca una estructura única y bien ordenada, sino que proponía una serie de compartimentos estancos entre los que la comunicación es difícil cuando no imposible. Sin embargo, el físico debería buscar de manera natural la unidad de la ciencia. También critica el intento de establecer un *experimentum crucis* por considerar que trata de aislar cada una de las hipótesis de la física teórica de todas las demás es un esfuerzo destinado al fracaso: la única comprobación experimental válida sería la realizada entre el sistema completo de la teoría física y el conjunto global de leyes experimentales⁹⁰.

Ahora bien, dado que la física teórica es una física matemática, nos debemos plantear la cuestión de qué atributos físicos pueden ser representados por símbolos numéricos y,

⁸⁷ Marcos, Alfredo: “La filosofía de la ciencia de Pierre Duhem en su contexto cultural”, en S. Menna y M. Ribeiro (eds.), *Ciência e Conhecimento*, Editora CRV, Curitiba, Brasil, 2019, p. 35.

⁸⁸ Poincaré, H.: *La science et l'hypothèse*, París, 1903, p. 190. Citado por Duhem, Pierre en ⁸⁶.

⁸⁹ Duhem, Pierre: *La teoría física, su objeto y su estructura*, Barcelona, Herder, 2003, p. 31.

⁹⁰ Hernández, Óscar: “El convencionalismo en Pierre Duhem y Henri Poincaré”, *Revista de Filosofía de la Universidad de Costa Rica*, Vol. 40, n° 100, 2002, pp. 57-58.

por lo tanto, tratado con las herramientas matemáticas. La condición necesaria y suficiente para que así sea es que se trate de una magnitud, es decir, que esté dentro de la categoría aristotélica de cantidad. Así, podremos establecer las relaciones de igualdad y de desigualdad (mayor que y menor que) y un conjunto de propiedades. Esto, que en primera instancia se aplica a las longitudes mediante la elección de una longitud-patrón y la medida que se realiza a partir de ella, se puede extender a las superficies, los volúmenes, los ángulos y, en el caso que nos interesa a nosotros, al tiempo⁹¹. Para la mecánica, en la que “toda la ciencia se reduce a una especie de aritmética universal de la que está radicalmente desterrada la categoría de cualidad⁹²”, queda rechazada toda noción cualitativa, cayendo en el mecanicismo reduccionista cuyo origen se puede rastrear hasta Laplace⁹³. Duhem, sin embargo, plantea con la introducción de magnitudes como el potencial, la carga eléctrica ... e incluso la entropía (la más abstracta de todas ellas) en igualdad de condiciones con respecto a las magnitudes clásicas. Estas nuevas magnitudes son definidas en el espacio y en el tiempo, reemplazando a la acción a distancia newtoniana. La concepción de la teoría física en general y del tiempo en particular pasan del realismo al fenomenismo de manera que el tiempo y el espacio sólo podrían ser conocidos por nosotros mediante la interrelación con otros fenómenos. En palabras de Cassirer, “las determinaciones en el espacio no son, por tanto, tampoco, más que determinaciones de unos fenómenos por otros⁹⁴”. De igual manera ocurriría con el tiempo, estableciéndose, por lo tanto, de manera relacional. Desde esta nueva perspectiva, las propiedades y las magnitudes físicas serían las que construyen el sistema; no habría una objetivación a priori y la realidad física quedaría constituida a partir de las relaciones entre los efectos dentro del contexto físico experiencial.

⁹¹ Duhem, Pierre: *La teoría física, su objeto y su estructura*, Barcelona, Herder, 2003, pp. 137-142.

⁹² Duhem, P.: *Op. cit.*, p.148.

⁹³ Dary, Olga Luz. “La cosmovisión de Pierre Duhem: una perspectiva fenomenológica.”, *Física y Cultura: Cuadernos sobre Historia y enseñanza de las ciencias*, 8, 2014, p. 111.

⁹⁴ Cassirer, E.: *Fin y método de la física teórica*, México, FCE, 1983, p. 117.

5. CONCLUSIONES

El siglo XIX fue testigo de grandes cambios en todos los ámbitos de la ciencia. El desarrollo de forma progresiva de las distintas ramas cuyo origen común lo podemos encontrar en la mecánica de Newton, junto con la perspectiva cartesiana, acabarán cambiando por completo la configuración de la ciencia en general, de la física en particular y de los conceptos sobre los que se sostienen.

En lo que respecta al tiempo, el punto de partida es el tiempo absoluto, homogéneo, infinito y continuo que había propuesto Newton. Las primeras polémicas surgen ya durante la vida del inglés, a través de la crítica leibniziana que señala el hecho de que la existencia de un tiempo absoluto no puede ser comprobada experimentalmente y que debe estar ligado a la existencia de cuerpos y a la sucesión de hechos, además de objeciones de tipo teológico. Euler, por su parte, pretende hacer una mecánica exclusivamente racional prescindiendo de cualquier participación de la experiencia, tomando el tiempo un carácter lógico necesario para la representación científico-matemática del mundo. El tiempo sigue siendo homogéneo y absoluto, pero lo hace ya sin relación a la experiencia. Tanto para Newton como para Euler resultaba vital el concepto de fuerza. D'Alembert consideraba el concepto de fuerza carente de significado. Coincidió, sin embargo, con Euler al considerar el tiempo como independiente de la experiencia, matemático y, por lo tanto, derivable de los teoremas básicos de la geometría que, además deben ser pocos y definidos con la mayor claridad posible. El tiempo ha de ser así una idea simple y evidente necesaria para comprender la noción de movimiento. Lagrange transforma la mecánica en análisis matemático y el tiempo para ser una variable bajo esas condiciones, no introduce consideraciones profundas desde el punto de vista filosófico, pero su ausencia de justificación metafísica o epistemológica y su transformación en una variable matemática abren el camino a consideraciones positivistas del mismo. Laplace, por su parte, incide en el determinismo, lo que le lleva a concebir el tiempo como homogéneo y, al ser las interacciones siempre idénticas y ligadas por la relación causa-efecto, como reversible.

En el siglo XIX nos encontramos con el pleno desarrollo del electromagnetismo, de la óptica y de la termodinámica. Todos estos nuevos puntos de vista influirán, cómo no, en el conjunto de la física y en la conceptualización del tiempo y nos dejarán ya a las puertas de un nuevo siglo y de una nueva teoría: la relatividad. Pero vayamos paso a paso.

Helmholtz, desde posiciones neokantianas, intenta explicar la física tomando como punto de partida la ley de inercia. Así, el espacio y el tiempo serían las condiciones de posibilidad de todo conocimiento y, por lo tanto, del establecimiento matemático de leyes causales. Para cuantificar el movimiento necesitamos los axiomas de la cronometría (y de la geometría). Helmholtz vinculó los principios a priori al proceso de percepción humana y hace una ciencia de un espacio que contiene cuerpos rígidos en movimiento, confirmando el carácter cinemático de su teoría. El descubrimiento de geometrías alternativas acaba con la geometría euclídea como estructura indiscutible del espacio. Finalmente, si podemos establecer geometrías alternativas debemos optar o bien por estipular arbitrariamente una de ellas y cambiamos la ley de inercia o la geometría será válida únicamente de manera temporal y en relación a nuestras observaciones particulares. Si lo aplicamos al caso concreto del tiempo, este ya no formará parte de las estructuras a priori del conocimiento, sino que tendrá que ser definido como dependiente del binomio que forman la ley de inercia y la cinemática (y de las diferentes configuraciones que puede formar esta dupla).

Boltzmann se acercará al problema desde la termodinámica, intentando hacer que el primer y el segundo principio de la termodinámica puedan convivir a la vez. El primero, establecía que la energía dentro de un sistema debe permanecer constante y el trabajo recibido por el sistema se debe equilibrar con el calor desprendido; el segundo principio nos dice que un sistema en equilibrio avanza hacia el grado máximo de entropía, lo que implica, en general, que los procesos termodinámicos son irreversibles, es decir, que el tiempo avanza en un sentido, pero no en el contrario. Además, había que conjugar la termodinámica con la teoría molecular y eso se hacía relacionando el aumento de temperatura con las colisiones de las moléculas que forman la materia. Una materia muy ordenada tendrá baja temperatura y el sistema que se encuentre tenderá hacia un desorden que, en sentido termodinámico, resulta más estable. Sin embargo, calcular el movimiento de las moléculas dentro de un cuerpo es imposible, por lo que debemos conformarnos con una descripción estadística y ya no con datos exactos: no podremos hacer predicciones certeras. La ventaja de la termodinámica es que puede explicar correctamente aquello que es reconocido de manera inequívoca por nuestra razón. La pregunta que se nos plantea es: ¿cómo es posible que lo que funciona de manera reversible en términos microscópicos (en los que se puede aplicar la mecánica) acabe siendo, cuando se trata de escala macroscópica, un proceso irreversible? En realidad, el universo no es homogéneo y cada

parte funciona como un subsistema con diferentes flechas del tiempo: decimos entonces que lo que establecemos son tiempos locales más que un tiempo genérico.

Ya llegando al final del siglo XIX y entrando en los primeros años del siglo XX encontramos las posiciones de Poincaré y la de Duhem. Poincaré será el encargado de llevar la física hasta sus límites, señalando el hecho de que la propuesta de Maxwell, pese a encontrar una explicación a multitud de fenómenos físicos, carecía de la completitud físico-matemática que pudiese poner en relación unos con otros. Las analogías sobre las que se intentaba construir esta relación entre electromagnetismo, mecánica y óptica resultaban para Duhem demasiado forzadas y, por lo tanto, no contribuían a explicar la naturaleza. En realidad, el criterio que debemos seguir para encontrar los fundamentos de las leyes físicas es que el fenómeno que intentamos explicar sea simple y de fácilmente asimilado gracias a dichos fundamentos. Su aproximación geométrica se contraponen al método (que se había demostrado para él improductivo y agotado) de la analítica. Concretamente, el intento de resolución el problema de los tres cuerpos lleva a Poincaré a plantear una solución de este tipo que, tras muchos avatares, resulta mucho más satisfactoria que los intentos anteriores de resolución. De la misma manera, profundizando en la geometría, Poincaré se plantea qué criterio debemos seguir para elegir el tipo de geometría con el que trabajar en el ámbito de la física. En realidad, la geometría euclídea no es la única forma de describir la naturaleza del espacio; de hecho, resulta más conveniente para multitud de problemas físicos elegir otro tipo de geometrías que nos dan mejores resultados en cada caso concreto. Por lo tanto, el criterio que se debe seguir para elegir el enfoque geométrico es a todas luces convencional. Pero este convencionalismo podrá ser extendido también a otros conceptos aparte del espacio, como es al concepto de tiempo. Durante algunos años Poincaré estuvo encargado de la medida práctica del tiempo con el fin de establecer un horario unificado para el establecimiento exacto de los meridianos terrestres. Esto le llevó a plantearse conceptos como el de simultaneidad o el de anterioridad y su relación con el principio de causa-efecto. Una vez más la solución más conveniente es la que se debe imponer.

Hemos visto cómo el gran progreso en las matemáticas y en la física que se produjo en el siglo XVIII sirvió de trampolín para lo que ocurrió en el siglo XIX. Las matemáticas crecen a través del análisis y la geometría; la física, gracias al desarrollo del electromagnetismo, de la óptica y de la termodinámica. Ambas cooperan para avanzar hacia una mejor descripción del Universo y de las leyes que lo regulan. La filosofía de la

ciencia acude para interpretar lo que supone elegir una determinada manera de ordenar el conocimiento y busca los límites y las raíces de ese conocimiento. En el caso de concepto de tiempo, hemos visto cómo se pasa desde el tiempo absoluto newtoniano a un tiempo relacional y convencional que abre las puertas a las explicaciones que vendrán de la mano de la física relativista (que supone un cambio de paradigma) y del desarrollo de la termodinámica. Ambas se aliarán en el siglo XX para abrir las posibilidades de entender el tiempo como un elemento generador más que como una estructura que sirve únicamente para dar cuenta de la sucesión de los fenómenos. Así, podemos concluir que la pregunta que guiaba nuestra investigación, acerca de si el concepto de tiempo era o no invariante desde Newton hasta el final de la física clásica recibe una respuesta inequívocamente negativa, y que, pese a la estabilidad de la mecánica newtoniana, esto no significa que los conceptos permanezcan inmutables tal y como Newton los había definido. En definitiva, la historia es, con frecuencia, más compleja de lo que a primera vista nos aparece.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Alonso, Carlos J.: *Historia básica de la ciencia*, Pamplona, EUNSA, 2001.
- Balian, Roger: “Le temps macroscopique”, en E. Klein y M. Spira (eds.), *Le temps et sa flèche*, París, Frontières, 1995.
- Boltzmann, Ludwig: *Escritos de mecánica y termodinámica*, Madrid, Alianza, 1986.
- Capek, Milic: *El impacto filosófico de la física contemporánea*, Madrid, Tecnos, 1973.
- Cassirer, E.: *Fin y método de la física teórica*, México, FCE, 1983.
- D'Alembert: *Traité de Dynamique*, París, 1743, p.iv.
- Dary, Olga Luz. “La cosmovisión de Pierre Duhem: una perspectiva fenomenológica.”, *Física y Cultura: Cuadernos sobre Historia y enseñanza de las ciencias*, 8, 2014.
- Duhem, Pierre: *La teoría física, su objeto y su estructura*, Barcelona, Herder, 2003.
- Eddington, Arthur Stanley: *La naturaleza del mundo físico*, Buenos Aires, Sudamericana, 1945.
- Einstein, Albert: “La influencia de Maxwell en el desarrollo de los conceptos de la realidad física”, 1931 a.
- Einstein, Albert: *Notas Autobiográficas*, Madrid, Alianza Editorial, 1984.
- Euler, Leonhard: *Reflexiones sobre el espacio, el tiempo y la materia*, Madrid, Alianza Editorial, 1985.
- Euler, Leonhard: *Theoria Motus Corporum Solidorum seu Rigidorum*, Rostichii et Gryphiswaldiae, A. F. Röse, 1765.
- Feynman, Richard, *El carácter de la ley física*, Barcelona, Alberto Bosch, 1983.
- Fraser, Craig G.: “J. L. Lagrange’s Early Contributions to the Principles and Methods of Mechanics”, en *Archive for the History of Exact Sciences*, 28, 1983.
- Frasier, Craig G.: “Lagrange’s analytical mathematics, it’s cartesian origins and the reception in Comte’s positive philosophy”, *Stud. Hist. Phil. Sci.*, Vol. 21, N° 2, 1990.
- Galison, Peter: *Relojes de Einstein, mapas de Poincaré*, Barcelona, Crítica, 2005.
- García, Antonio: “La pregunta que Poincaré no pudo contestar”, 2014, p. 14, tomado de Poincaré, «Méthodes nouvelles de la mécanique céleste». Vol. I, II, III. Gauthier-Villars et fils, París, Francia, Vol. I, 1892, Vol II, Vol III, 1899.

- García, Manuel: “El tiempo en la física: de Newton a Einstein”, *Enharonar* 15, 1989.
- Goroff: “Introduction”, en *Poincaré, New Methods*, 1993.
- Guzmán, Ricardo: “Ciencia, tecnología y sociedad en el siglo XIX”, *Revista de Humanidades*, n° 36, 2017.
- Guzón, José Luis: *El nuevo estatuto del tiempo*, Salamanca, Universidad Pontificia de Salamanca, 2002.
- Hankins, Thomas L.: *Jean d'Alembert, Science and Enlightenment*. Cambridge, Cambridge University Press, 1985.
- Harman, Peter M.: *Energía, fuerza y materia: El desarrollo conceptual de la física del siglo XIX*, Madrid, Alianza Universidad, 1990.
- Helmholtz, Hermann von: “On General Physical Concepts”, en S. Luft (ed.) *The Neo-Kantian Reader*, London, Routledge, 2012.
- Hernández, Óscar: “El convencionalismo en Pierre Duhem y Henri Poincaré”, *Revista de Filosofía de la Universidad de Costa Rica*, Vol. 40, n° 100, 2002.
- Hertz, Heinrich: *Untersuchungen über die Ausbreitung der elektrischen Kraft*, Leipzig, Johann Ambrosius Barth.
- Hyder, David: “Time, Norms, and Structure in Nineteenth-Century Philosophy of Science”, en *The Oxford Handbook of the History of Analytic Philosophy*, Oxford, Oxford University Press, 2013.
- Kuhn, T. S.: *La estructura de las revoluciones científicas, Breviarios*, México, Fondo de Cultura Económica, 1971.
- Lagrange, J. L.: *Mécanique analytique*, Paris, Albert Blanchard, 1965.
- Laplace, Pierre-Simon: *Introduction à la théorie analytique des probabilités, Oeuvres Complètes*, París, 1886.
- Marcos, Alfredo: “La filosofía de la ciencia de Pierre Duhem en su contexto cultural”, en S. Menna y M. Ribeiro (eds.), *Ciência e Conhecimento*, Editora CRV, Curitiba, Brasil, 2019.
- Mataix, Carmen: “La entropía y la flecha del tiempo”, en José Luis Gonzáles (ed.): *El taller de las ideas*, México DF, Plaza y Valdés, 2005.
- Maxwell, James Clerk: “On physical lines of force”, *Scientific Papers*, vol. 1.
- Maxwell, James Clerk: *Theory of heat*, Santa Fe, Courier Dover Publications, 2001.

- Newton, I.: 1727 A Letter of Mr. Isaac Newton, Professor of the Mathematicks in the University of Cambridge; Containing His New Theory about Light and Colors: Sent by the Author to the Publisher from Cambridge, Febr. 6. 1671/72; In Order to be Communicated to the R. Society. *Phil. Trans.*6.
- Newton, Isaac: *Principios matemáticos de la Filosofía natural*, Madrid, Tecnos, 1987.
- Newton, Isaac: *Methodus fluxionum et serierum infinitorum*, Londres, Henry Woodfall, 1736.
- Ordóñez, Javier y Rioja, Ana: “Introducción” en Pierre-Simon de Laplace: *Exposición del sistema del mundo*, Barcelona, Crítica, 2006.
- Ortiz Acuña, Leonardo: “Newton y Maxwell: la contraposición corpúsculos-onda”, *Coris. Revista de Ciencias Sociales y Humanidades*.
- Planck, Max: *¿A dónde va la ciencia?*, Buenos Aires, Losada, 1941.
- Poincaré, H.: *La science et l'hypothèse*, París, 1903.
- Poincaré, Henri: “La medida del tiempo”, en *El valor de la ciencia*, Buenos Aires, Espasa-Calpe, 1947.
- Poincaré, Henri: *Ciencia e Hipótesis*, Edición digital Biblioteca ILCE.
- Poincaré, Henri: *Sur le problème des trois corps*, 1890.
- Ponce Alberca, Carmen.: “Consideraciones en torno a la polémica Leibniz-Clarke”, *Espíritu*, 36, 1987.
- Prigogine, Ilya: *La nueva alianza. Metamorfosis de la ciencia*, Madrid, Alianza, 1990.
- Pulte, Helmut: “Joseph Louis. Lagrange, Mécanique Analytique, First Edition (1788)”, en I. Grattan-Guinness (de.): *Landmark Writings in Western Mathematics, 1640-1940*, Elsevier B. V., 2005.
- Reichenbach, Hans: *El sentido del tiempo*, México DF, Plaza y Valdés, 1988.
- Rioja, Ana: “Comentario a las Reflexiones sobre el espacio y el tiempo”, en Euler, Leonhard: *Reflexiones sobre el espacio, el tiempo y la materia*, Madrid, Alianza Editorial, 1985.
- Romero, Ángel E.: “La búsqueda de los principios fundamentales de la mecánica: Euler y d'Alembert”: *Los procesos de formalización y el papel de la experiencia en la construcción del conocimiento sobre los fenómenos físicos*, Bogotá, Universidad de Antioquia y Universidad Pedagógica Nacional, 2008.

- Sánchez Ron, José M.: “La Física Clásica (II): la electrodinámica de Maxwell”, en *Einstein, su vida, su obra y su mundo*, Barcelona, Ed. Crítica, 2015.
- Sánchez Ron, José M.: “La Física Clásica (II): la electrodinámica de Maxwell”, en *Einstein, su vida, su obra y su mundo*, Barcelona, Ed. Crítica, 2015.
- Sánchez Ron, José M.: “La física en España (I): el Siglo XIX”, *Revista Española de Física*. Enero-Febrero, 2003.
- Serra, Isabel y de Paz, María: “Poincaré and the Language of Physics in the 19th Century.” Fernández Duque, D. Et Al. (Eds.), *Estudios De Lógica, Lenguaje y Epistemología*, 2010.
- Van Fraassen, B. C.: *Introducción a la filosofía del tiempo y del espacio*, Barcelona, Editorial Labor, 1978.